

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté du Génie de la Construction**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de Fin d'Etudes**  
*En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique*  
*Option : Energétique*

## *Thème*

# ***ETUDE THERMIQUE ET DYNAMIQUE D'UNE CHAMBRE FROIDE***

**Proposé et dirigé par :**  
**M.I.BOUMRAR**

**Réalisé par :**  
**BADJA Belaid**  
**BENZAHI Bilal**

Devant le jury :

**Président : M.M.HAMZAOUI**  
**Encadreur : M.I.BOUMRAR**  
**Examineur : M.S.BOUDAOU**

*Promotion : 2018/2019*

## **Remerciements**

*Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadreur,*

*M<sup>r</sup>. I. BOUMRAR, pour sa disponibilité et ses conseils durant*

*toute la période de ce Projet de Fin d'Etude.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui*

*ont accepté d'examiner ce travail.*

*Notre reconnaissance va également à l'ensemble du personnel de*

*l'établissement SNC METNA et FRERES qui nous ont permis d'effectuer*

*un stage de deux mois.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin*

*à la réalisation de ce travail.*



# *DEDICACES*

*A*

*Ma mère : qui sait partager mes peines et joies*

*Mon père : pour son assistance morale durant tout mon cursus scolaire et  
universitaire*

*MES frère ET MES sœurs et mes neveux mayas thanina Sara Alicia islam ,ma jolie  
yasmine*

*Ma famille entière*

*Mes amis*

*à tous qui aiment l'éducation et la connaissance*

**BILAL**

Liste des Figures  
 Liste des Tableaux  
 Nomenclature

**Introduction Générale..... 1**

**Chapitre I : Généralités sur les Chambres Froides.**

**I.1. Introduction..... 2**

**I.2. Généralités sur les chambres froides..... 2**

- Le compresseur..... 3

- Le condenseur ..... 3

- Le détendeur ..... 4

- L'évaporateur ..... 4

**I.3. Isolation de la Chambre Froide ..... 5**

I. 3.1. Les types d'isolants ..... 5

I. 3.2. Les normes d'isolation..... 6

I.3.3 . Le choix de l'isolant pour la chambre froide..... 7

**I. 3.4 : Construction de l'isolation de la chambre..... 7**

**I.4. les types des chambres froides ..... 8**

I.4 .1 Les chambres froides positives ..... 8

I.4.2 La chambre froide négative ..... 9

**I.5. Les techniques de conservation..... 9**

I.5.1. La réfrigération..... 9

I.5.2. La congélation..... 10

I.5.3. La surgélation..... 10

**I.6. Conservation de quelques denrées..... 10**

- Viande ..... 10

- Poisson ..... 10

- fruits ..... 11

- légumes ..... 11

**I.7 Conclusion..... 11**

**Chapitre II : Calcul des Charges Thermiques de la Chambre Froide.**

**II.1. Introduction..... 12**

**II.2. Dimensions et caractéristiques de la chambre froide..... 12**

**II.3. Calcul des charges thermiques externes..... 14**

II .3.1. Charges thermiques par transmission à travers les parois : ( $Q_{tr}$ )..... 14

II.3.2. Charges thermiques par renouvellement d'air ( $Q_{re}$ )..... 17

II.3.3. Charges thermique par ouverture des portes ( $Q_{op}$ )..... 21

**II.4. Calcul des charges thermiques internes..... 25**

II.4.1.1 Charges thermiques dues à l'éclairage ( $Q_{ec}$ )..... 24

II.4.1.2. Charges thermiques dues aux personnes ( $Q_{pe}$ ).....	25
II.4.1.3.Charges thermiques dues aux matériels roulants ( $Q_{mr}$ ) .....	26
II.4.1.4 .Charges thermiques dues aux machines diverses ( $Q_{md}$ ).....	27
II.4.1.5. Charges thermiques dues aux moteurs des ventilateurs des évaporateurs ( $Q_{vent}$ ) .....	27
<b>II.4.2. Charges thermiques internes dépendantes des denrées entreposées .....</b>	<b>28</b>
II.4.2.1: Charges thermiques dues aux denrées entrantes ( $Q_{de}$ ).....	28
<b>II.5. Puissance frigorifique intermédiaire de l'évaporateur (<math>Q_{o,int}</math>).....</b>	<b>29</b>
<b>II.6. Conclusion .....</b>	<b>29</b>

### **Chapitre III : Formulation Mathématique des Equations des Champs de Vitesse et de Température.**

<b>III.1. Notions sur les écoulements.....</b>	<b>30</b>
III.1.1. Nombre de Reynolds.....	30
III .1.2. Régimes d'écoulement.....	30
-Régime laminaire.....	30
- Régime transitoire.....	31
- Régime turbulent.....	31
<b>III.2. Les couches limites .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3. Formulations mathématiques.....</b>	<b>32</b>
-Equation de continuité .....	32
-Equations de quantité de mouvement.....	32
-Equation d'énergie.....	32
- Equations de Navier Stokes .....	34
<b>III. 4. Adimensionnalisation des équations du mouvement .....</b>	<b>34</b>
<b>III. 5. Adimensionnalisation de l'équation d'énergie.....</b>	<b>36</b>
<b>III. 6 Conclusion.....</b>	<b>38</b>

### **Chapitre IV : Mesures Expérimentales de la Température à l'intérieur de la Chambre Froide.**

<b>IV.1. Descriptif de l'expérimentation .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.2. Instrumentation de mesures .....</b>	<b>40</b>
IV. 2.1 : Thermomètre infrarouge.....	40
IV.2.2 : Thermocouple numérique .....	40
<b>IV .3. Séquences de mesures .....</b>	<b>41</b>
IV.3.1.Plans transversaux .....	41
IV.3.1.1. Plan transversal à $x=1/4 L= 2.75$ m .....	41
IV.3.1.2. Plan transversal à $x=2/4 L= 5.5$ m .....	42
IV.3.1.3. plan transversal à $x= 3/4 L= 8.25$ .....	43
IV.3.2. plan longitudinal .....	43
<b>IV.4. analyse des résultats expérimentaux .....</b>	<b>44</b>
<b>IV.5. Conclusion.....</b>	<b>47</b>

## Chapitre V : Simulation Numérique

<b>V.1. Gambit</b> .....	48
V.1.1. Interface principale de gambit .....	48
V.1.2. Répertoire d'outils d'opérations.....	49
V.1.3. Bouton création de la géométrie.....	49
V.1.4. Bouton de maillage.....	50
V.1.5. Bouton de définitions des conditions aux limites .....	50
V.1.6. Bouton de contrôle générale .....	51
<b>V.2. Code Fluent</b> .....	51
V.2.1. Fenêtre de démarrage.....	51
V.2.2. Interface principale.....	52
<b>V.3. Maillage de la géométrie</b> .....	53
<b>V.4. Résultats de la simulation numérique pour le plan longitudinal</b> .....	53
V.4.1. Champ de pression et densité.....	53
V.4.2. Champ de vitesse et turbulence.....	54
V.4.3. Champ de température.....	54
<b>V.5. Résultats de la simulation numérique pour le plan transversal</b> .....	57
V.5.1. Champ de température .....	57
V.5.2. Champ de vitesse pour $V_0=3$ m/s.....	58
V.5.3. Profile de pression, de densité et de turbulence.....	60
V.5.4. Profile de température et turbulence .....	61
<b>V.6. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux</b> .....	62
V.6.1. Plan transversal ( $x=1/4L$ ).....	62
V.6.2. Plan longitudinal .....	64
<b>V.7. Conclusion</b> .....	66
 <b>Conclusion Générale</b> .....	 67

### Références Bibliographiques

### Annexes

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1 :</b> Coefficient de transmission thermique K d'une paroi sandwich composée d'une âme en mousse rigide de polyuréthane et deux revêtements métalliques.....	15
<b>Tableau II.2 :</b> Calcul de la résistance thermique des différentes couches de matériaux constituant le sol de la chambre froide.....	16
<b>Tableau II.3 :</b> Résistances thermique superficielles $1/h_e$ en $[m^2 K.W]$ des parois d'une chambre froide.....	17
<b>Tableau II.4 :</b> Durée moyenne de transit de différents types de marchandises entreposées en chambre froide.....	22
<b>Tableau II.5 :</b> Densités d'entreposages de différentes marchandises.....	23
<b>Tableau II.6 :</b> Coefficient d'occupation du sol d'une chambre froide en fonction du type d'entreposage des marchandises.....	23
<b>Tableau II .7 :</b> Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par personne en activité moyenne dans une chambre froide.....	26
<b>Tableau II.8 :</b> Enthalpie massique en kJ/kg de denrée en chambre froide.....	28

Liste des Figures

<b>Figure I.1 :</b> Schéma de circulation du fluide frigorigène d'une chambre froide.....	2
<b>Figure I.2 :</b> Diagramme enthalpique de compression.....	3
<b>Figure I.3 :</b> Diagramme enthalpique condensation.....	3
<b>Figure I.4 :</b> Diagramme de la détente enthalpique.....	4
<b>Figure I.5 :</b> Diagramme enthalpique de l'évaporation .....	4
<b>Figure.I.6 :</b> Temperature de conservation de quelques aliments.....	11
<b>Figure II.1 :</b> Dimensionnement et caractéristique de la chambre froide.....	13
<b>Figure II.2 :</b> Nombre de renouvellement d'air par 24h.....	19
<b>Figure II .3 :</b> Diagramme de l'air humide.....	20
<b>Figure III .1 :</b> Ecoulement laminaire.....	31
<b>Figure III .2 :</b> Ecoulement turbulent.....	31
<b>Figure IV.1:</b> Plans transversaux et longitudinale.....	39
<b>Figure IV.2 :</b> Photo d'un thermomètre infrarouge.....	40
<b>Figure IV.3 :</b> Photo d'un thermocouple numérique.....	41
<b>Figure IV.4:</b> Evolution de la température dans le plan transversal à $x=1/4 L= 2.75$ m .....	41
<b>Figure IV.5:</b> Evolution de la température suivant dans le plan transversal $x=2/4 L= 5.5$ m.....	42.
<b>Figure IV.6:</b> Evolution de la température dans le plan transversale à $x= 3/4 L = 8.25$ m.....	43
<b>Figure IV.7 :</b> Evolution de la température suivant l'axe ox , plan médiane.....	44
<b>Figure IV.8 :</b> Evolution de la température suivant l'axe oy, (A) $z=0$ m, (B) $z=0.5$ m,(C) $z = 1$ m, (D) $z = 1.5$ .....	45
<b>Figure IV.9 :</b> Evolution de la température suivant l'axe oy, (E) $z =2$ m, (F) $z = 2,5$ m. (G) $z =3$ m, (H) $z = 3,5$ m.....	46
<b>Figure V.1 :</b> Interface principale.....	48
<b>Figure V.2 :</b> Répertoire d'outils d'opérations.....	49
<b>Figure V.3 :</b> Menu de création des géométries.....	49
<b>Figure V.4 :</b> Menu de maillage. ....	50
<b>Figure V.5 :</b> Menu de définition des conditions aux limites. ....	50
<b>Figure V.6 :</b> Fenêtre de contrôle générale. ....	51
<b>Figure V.7:</b> Fenêtre de démarrage. ....	51
<b>Figure V.8 :</b> Interface principale. ....	52
<b>Figure V.9 :</b> Maillage de la géométrie. ....	53

## Liste des Figures

<b>Figure V.10</b> : Contours de pression. ....	53
<b>Figure V.11</b> : Contours de densité. ....	54
<b>Figure V.12</b> : Contours de vitesse.....	54
<b>Figure V.13</b> : Vecteurs vitesses. ....	55
<b>Figure V.14</b> : Contours de turbulence. ....	55
<b>Figure V.15</b> : Contours de température (K). ....	56
<b>Figure V.16</b> : Evolution des températures numériques (K) dans le plan longitudinal.....	56
<b>Figure V.17</b> : Contours de température (K) pour le plan transversal $x=1/4L=2,5m$ .....	57
<b>Figure V.18</b> : Contours de température (K) pour le plan transversal $x=2/4L=3,5m$ .....	57
<b>Figure V.19</b> : Contours de température (K) pour le plan transversal $x=3/4L=7m$ .....	58
<b>Figure V.20</b> : Champ de vitesse pour le plan $x=1/4L=2,5m$ . ....	58
<b>Figure V.21</b> : Champ de vitesse pour le plan $x=2/4L=3,5m$ .....	59
<b>Figure V.22</b> : Champ de vitesse pour le plan $x=3/4L=7m$ .....	59
<b>Figure V.23</b> : Profile de vitesse pour le plan $x=1/4L=2,5m$ .....	60
<b>Figure V.24</b> : Profile de pression pour le plan $x=1/4L=2,5m$ .....	60
<b>Figure V.25</b> : Profile de densité pour le plan $x=1/4L=2,5m$ .....	61
<b>Figure V.26</b> : Profile de température numérique (k) pour le plan $x=1/4L=2,5m$ .....	61
<b>Figure V.27</b> : Profile de turbulence pour le plan $x=1/4L=2,5m$ .....	62
<b>Figure V.28</b> : comparaison des températures numériques et expérimentales ( $z= 0 m$ et $z=0.5m$ ).....	62
<b>Figure V.29</b> : comparaison des températures numériques et expérimentales ( $z= 1 m$ et $z=1.5 m$ ).....	63
<b>Figure V.30</b> : comparaison des températures numériques et expérimentales ( $z= 2 m$ et $z=2.5 m$ ) .....	63
<b>Figure V.31</b> : comparaison des températures numériques et expérimentales ( $z= 3 m$ et $z=3.5 m$ ) .....	64
<b>Figure V.32</b> : Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 0m$ et $z=0,5 m$ ) Plan longitudinal.....	64
<b>Figure V.33</b> : Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 1m$ et $z=1,5 m$ ) Plan longitudinal.....	65
<b>Figure V.34</b> : Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 2m$ et $z=2,5 m$ ) Plan longitudinal.....	65
<b>Figure V.35</b> : Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 3m$ et $z=3,5 m$ ) Plan longitudinal.....	66

## Liste des Figures

---

# NOMENCLATURE

---

## *Nomenclature*

$A$	surface de la chambre froide.	[m <sup>2</sup> ]
$C_{ra}$	Coefficient de minoration dû à la présence éventuelle d'un rideau d'air.	-
$C_1$	Capacité thermique massique moyenne entre $t_1$ et $t_2$ de chaque type de denrées introduite.	[kJ/kg. °C]
$C_p$	Chaleur spécifique de l'air.	-
$D$	Durée de fonctionnement chaque type de machine	[h/j]
$d_e$	Densité d'entreposage.	[kg/m <sup>3</sup> ]
$d_t$	Durée moyenne d'ouverture des portes (aller et retour) pour permettre le passage des marchandises en minute par tonne	[min/tonne]
$f_x$	Force du volume suivant l'axe $ox$ .	-
$f_y$	Force du volume suivant l'axe $oy$ .	-
$f_z$	Force du volume suivant l'axe $oz$ .	-
$f_i$	Flux journalier des marchandises en	[tonne/jour]
$f_i$	Force de volume.	
$h_{ae}$	L'enthalpie de l'air extérieur	[kJ/kg].
$h_{aa}$	L'enthalpie de l'air ambiant en	[kJ/kg].
$h_p$	Hauteur de la porte en	[m]
$H$	Hauteur de la chambre froide	[m]
$i$	Nombre de lampes.	-
$\dot{i}$	Nombre de personnes opérant dans la chambre froide.	-
$K$	Coefficient de transmission thermique de la paroi considérée	[W/ m <sup>2</sup> .K]
$i$	Nombre de personnes opérant dans la chambre froide.	-
$\dot{i}$	Nombre de machine d'un type donné.	-
$L$	Longueur de la chambre froide.	[m]
$l$	largeur de la chambre froide.	[m]
$l_p$	Largeur de la porte	[ m]

## NOMENCLATURE

---

$m_{ae}$	débit-masse d'air extérieur	[kg/s]
m	Masse de denrées introduite chaque jour	[kg]
n	nombre de renouvellement d'air par 24 heures.	-
$n$	Nombre de moteur de ventilateurs.	-
$P$	Puissance de chaque lampe	[W]
$P$	Puissance du ventilateur considérés	[W]
$P$	Puissance de chaque type de machine	[W]
$P$	Puissance totale de chaque type de matériel roulant	[W]
$q_p$	Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne en activité moyenne dans une chambre froide	[W]
$Re$	nombre de Reynolds.	-
S	Surface de la paroi considérée	[m <sup>2</sup> ]
$t_e$	Température à l'extérieur.	[°C]
t	Durée de fonctionnement des lampes .	[min/h]
$t'$	Durée de présence de chaque personne dans la chambre froide.	[min/h]
t	Durée de fonctionnement du matériel roulant.	[min/h]
$t_1$	Température initiale de la denrée introduite	[°C]
$t_2$	Température de réfrigération de la denrée introduite	[°C].
$t_a$	Température ambiante dans la chambre froide .	[°C]
$T_0$	Température ambiante.	[°C]
$T_e$	Température de l'enceinte.	
T	Température ponctuelle.	[°C]
$\bar{T}$	Température adimensionnelle.	-
U	module de vitesse suivant l'axe ox.	-
$\bar{u}$	vitesse adimensionnelle.	-

## NOMENCLATURE

---

$\vec{U}$	Vecteur vitesse de l'écoulement	-
V	module de vitesse suivant l'axe oy	-
$\bar{V}$	vitesse adimensionnelle.	-
$V_{a,e}$	Débit volume d'air extérieur en	[m <sup>3</sup> /s]
$V_{cf}$	volume de la chambre froide en	[m <sup>3</sup> ]
W	module de vitesse suivant l'axe oz.	-
$\bar{w}$	vitesse adimensionnelle.	-

### Lettre grecques

$\mu$	viscosité dynamique.	[kg/m.s]
$\nu$	viscosité cinématique.	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$ :	masse volumique du fluide.	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$ :	Conductivité thermique.	[w/m. k]
$\varphi_{a,a}$ :	Masse volumique de l'air de la chambre froide en	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_{ae}$	Masse volumique de l'air extérieur	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_{evap}$	durées de fonctionnement des ventilateurs	[h/24]
$\tau_{inst}$	Durée de marche de l'installation frigorifique	[h/24]
$\tau_p$	Temps d'ouverture des portes exprimés	[min /h]
$\eta_0$	Coefficient d'occupation au sol des marchandises (tenant com des passages es espacements a respecte entre les caisses – palettes ...etc.)	%

# NOMENCLATURE

---

## Les écarts

$\Delta t$	Différence de température entre les deux cotés de la paroi considérée	[m <sup>2</sup> ].
$\Delta h$	différence enthalpie entre l'air extérieur et l'air ambiant de la chambre froide en	[kJ/kg]
$\Delta t_p$	Ecart de température de l'air entre les deux cotés de la porte.	[°C]
$\Delta T$	Laplacien de température.	-

## Abréviations

CFD : Computational Fluid Dynamics

LCD : liquid cristal display

.

.

## Introduction Générale

Dans l'industrie alimentaire, la réfrigération des produits représente un secteur d'activités très important pour la conservation des produits frais. Les basses températures permettent de limiter la croissance des micro-organismes et par conséquent de prolonger la durée de conservation des produits laitiers et autres. Le froid peut être classé en deux grandes catégories : le froid positif où la température de réfrigération dans la chambre froide est supérieure à 0 °C (entre 1 °C et 12 °C), et le froid négatif où la température de réfrigération dans la chambre froide est maintenue en dessous de 0 °C (entre 0 et -40 °C). La réfrigération est devenue aujourd'hui indispensable pour l'humanité avec des applications de plus en plus vastes et diversifiées, donc l'utilisation du froid est très rependue. Cette alternative fait l'objet de notre modeste présent travail.

Notre choix est porté sur l'étude d'une chambre froide locale du secteur privé sise à Tamda (Tizi-Ouzou), d'abord on s'est intéressé à l'étude thermique et dynamique de cette dernière, par calcul des charges thermiques totales et étude des variations de la température à l'intérieur de cette chambre froide pour assurer une très bonne réfrigération des produits.

Les produits sont refroidis par convection forcée ce qui engendre des transferts de chaleur complexes. Par ailleurs, à l'échelle industrielle il est nécessaire d'assurer le refroidissement simultané d'un ensemble de produits qui sont en vrac ou disposés dans des contenants de formes variables.

Le premier chapitre de ce mémoire introduit les généralités et les différentes informations nécessaires pour comprendre le principe de fonctionnement d'une chambre froide.

Le deuxième chapitre est dédié aux calculs des charges thermiques et le bilan frigorifique de la chambre froide située à Tamda, dans l'établissement SNC METNA à 20 km de chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le troisième chapitre est consacré aux formules mathématiques des champs de vitesse et de température, on s'intéresse à l'écoulement de l'air issu à partir de l'évaporateur et son mouvement qui engendre le refroidissement de la chambre froide.

Dans le chapitre quatre on a procédé à la mesure expérimentale de la température à l'intérieure de la chambre froide ce qui nous a permis d'effectuer une analyse générale du champ de température à travers les différentes courbes obtenues.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation numérique, effectuée avec le code de calcul Fluent, ce qui nous a permis d'obtenir la répartition numérique de la température et de la pression ainsi que d'autres paramètres importants, les résultats numériques sont validés par les mesures expérimentales de la température obtenues. A la fin une conclusion générale relate les principaux résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les chambres froides**

## I.1 Introduction

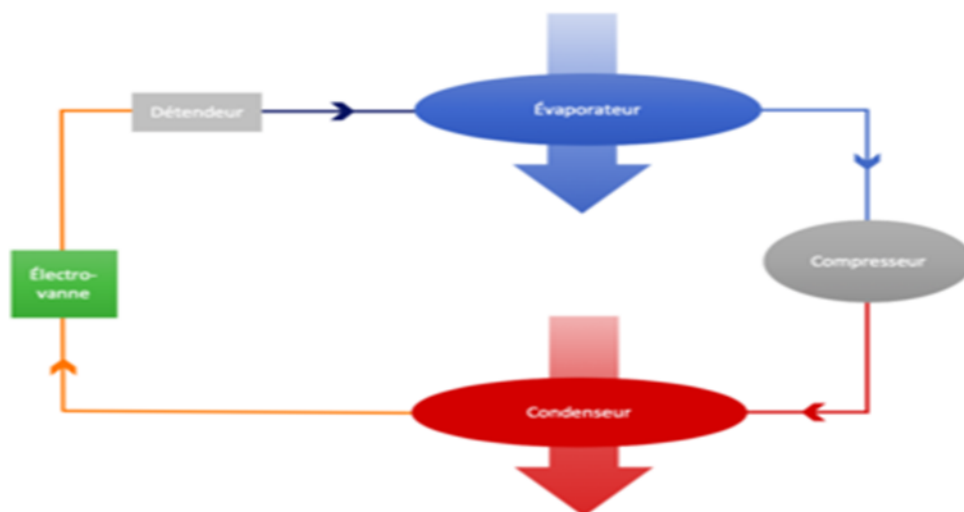
Pour maintenir un local à une température ambiante inférieure à la température extérieure, il est nécessaire de prévoir une installation frigorifique dont la puissance soit correctement déterminée et les composants parfaitement sélectionnés.

La puissance de l'installation frigorifique résulte directement du calcul des charges thermiques, qui doivent être ni sous-estimées sous peine de ne pouvoir atteindre la température de consigne prévue, ni surestimées car la puissance prévue étant alors trop élevée.

Le coût d'investissement de l'installation est très important d'où un risque pour le soumissionnaire le plus disant de perdre le marché ; en outre, le coût d'exploitation s'en trouve lui aussi revu à la hausse et la régulation n'en devient que plus délicate. Il est donc nécessaire de déterminer les charges au plus juste, c'est-à-dire d'effectuer un calcul sérieux sur la base d'éléments précis.

## I.2 Généralités sur les chambres froides

Une chambre froide est une enceinte isolée dans laquelle sont maintenues de basses températures en vue de la conservation de produits alimentaire, l'abaissement de température est assuré par une machine frigorifique. Toutes les chambres ont le même fonctionnement qu'elles soient positives ou négatives. Ce sont des machines frigorifiques par conséquent leur fonctionnement est basé sur la capacité de certains fluides à se condenser ou à s'évaporer à des températures différentes selon la pression. [1]



**Figure I.1** : Schéma de circulation du fluide frigorigène d'une chambre froide. [3]

Toute chambre froide est composée de quatre éléments principaux :

**Le compresseur :** Est l'élément qui aspire le gaz basse pression et basse température qui quitte l'évaporateur pour le renvoyer vers le condensateur sous haute pression et sous haute température. [2]

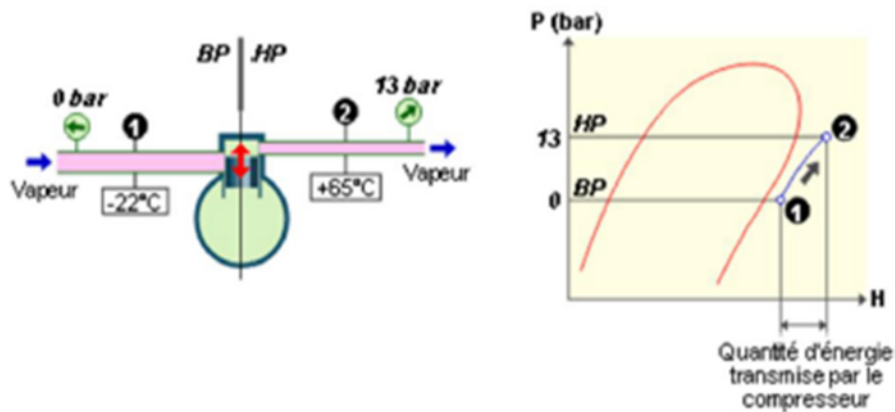


Figure I.2 : Diagramme enthalpique de compression. [3]

**Le condenseur :** Est l'élément qui permet au liquide frigorigène de passer de l'état vapeur à l'état liquide. Ce phénomène de condensation s'effectue grâce au refroidissement. On peut refroidir grâce à un condenseur avec ventilateur, avec un condenseur statique ou encore avec un condenseur par eau. [2]

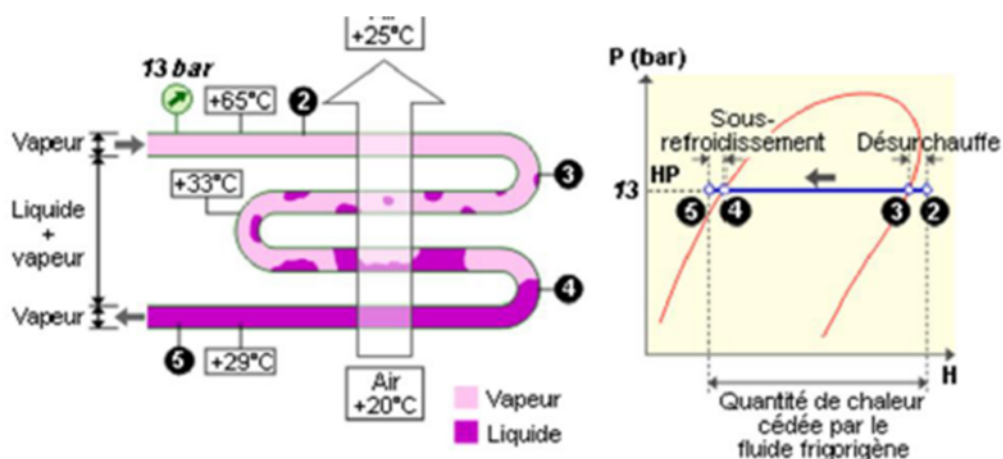


Figure I.3 : Diagramme enthalpique condensation. [3]

Le condensateur cède son énergie au médium considéré soit de l'air ou de l'eau.

Le déshydrateur permet de filtrer les impuretés et piège l'humidité.

**Le détendeur :**

Est l'organe qui assure le bon remplissage de l'évaporateur en fluide frigorigène. Il réduit la pression à l'entrée de l'évaporateur pour réduire la température du fluide. On parle de détendeur thermostatique. [2]

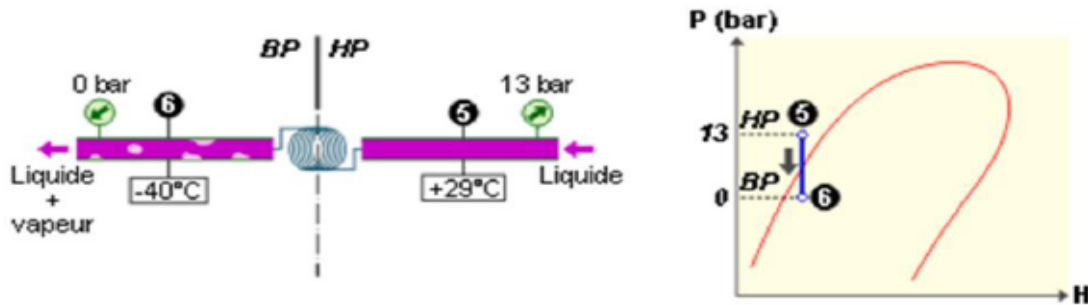


Figure I.4 : Diagramme de la détente enthalpique. [3]

**L'évaporateur :**

Est un échangeur de chaleur qui transforme le liquide en vapeur. Pour mieux diffuser l'air dans la chambre froide un système de ventilation est souvent intégré. L'évaporateur est relié à une évacuation d'eau pour les condensats. Toutefois pour les chambres froides négatives il faut prévoir un fils chaud qui permet d'éviter la formation de glace. L'évaporateur absorbe l'énergie au médium considéré que ce soit de l'air ou de l'eau. [2]

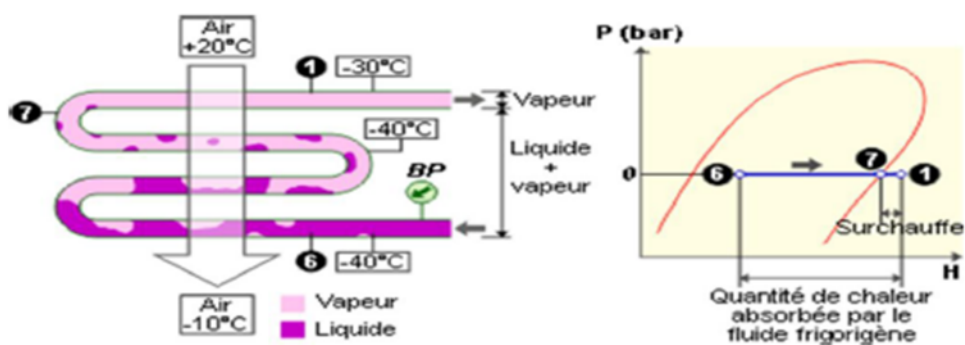


Figure I.5 : Diagramme enthalpique de l'évaporation. [3]

### I.3 Isolation de la chambre froide [5]

L'isolation permet de diminuer le cout des frigories produites. Les isolants limitent les échanges thermiques entre le milieu extérieur et le milieu intérieur. Une bonne isolation s'impose donc pour le container afin de réduire les apports thermiques.

Un bon isolant doit :

- avoir une faible densité.
- avoir une très faible conductivité thermique.
- avoir une bonne résistance à la diffusion de La vapeur.
- être non hygroscopique.
- être imputrescible.
- être résistant, et stable entre certaines limites de température.
- être ininflammable.
- être sans action sur le fer ou les matériaux en contact.
- être d'un prix raisonnable.
- conserver constante dans le temps, ses qualités d'isolation.

#### I.3.1 Types d'isolants [5]

Les matériaux les plus utilisés comme isolant sont :

**Le liège :**

- Prix élevé.
- Bonne résistance mécanique et stable dans le temps.
- Masse volumique : 110 à 130 kg/m<sup>3</sup>.
- Conductivité thermique : 0.044 w/m .K.

**La fibre de verre :**

- Bonne résistance à l'effritement.
- Masses volumiques les plus utilisées en isolation frigorifique :  
22 kg/m<sup>3</sup> (Panneaux semi rigide PI 156), et 29 kg/m<sup>3</sup> (panneaux rigides PSF).
- Conductivité thermique (0.035 w/m. K).

**Le polystyrène expansé :**

- Prix moyen.
- Résistance mécanique moyenne.

- Stable dans le temps.
- Isolation et pare-vapeur très bon mais inflammable et léger.
- Masse volumique : 20 à 30 kg /m<sup>3</sup>.
- Conductivité thermique : 0.029w .m .k

**Les mousses de polyuréthane :**

- Masse volumique: 30 à 40 Kg/m<sup>3</sup>
- Conductivité thermique : 0. 027 w/m. k
- Prix moyen.
- Leger.
- Résistance mécanique moyenne.
- Stable dans le temps.

**Les Caoutchoucs mousses :**

- Isolation des circuits frigorifiques et gaine d'air.
- Masse volumique: 90 Kg/m<sup>3</sup> (tube) et 113 kg/m<sup>3</sup> (plaque).
- Conductivité thermique 0.03 W /m. K

**La Laine de verre :**

- Très bon isolant thermique et acoustique.
- Un des matériaux d'isolation les moins chers du marché.
- Incombustible et résistante au feu.
- Durée de vie élevée.
- Non utilisée pour le sol.
- Conductivité thermique: 0.035 W / m .K

**La Laine de roche :**

- Très bon isolant.
- Cout acceptable.
- Masse volumique : 21 à 250 kg/m<sup>3</sup>
- Conductivité thermique: 0.093 W / m .K

**I.3. 2 Normes d'isolation**

L'isolation d'une chambre froide a une importance capitale sur le fonctionnement général de l'installation. Trop faible, elle facilite l'entrée de chaleur par conduction à travers les parois et l'augmentation du temps de marche du compresseur. L'isolation doit limiter le coefficient global de transmission thermique à 0.36 W /m. K à travers toutes les parois du container. [5]

### I.3.3 Choix de l'isolant pour la chambre froide

A cause de ses qualités intéressantes et son cout abordable on prend comme isolant la mousse de polyuréthane dont les caractéristiques sont :

- Conductivité thermique : 0.027 W /m. K
- épaisseur à mettre : compatible avec les normes d'isolation.
- mode de construction : panneaux en sandwich à âme isolante en mousse de polyuréthane.

### I. 3.4 Construction de l'isolation de la chambre

Après avoir effectué le choix de l'isolant, son épaisseur doit être calculée pour chaque paroi de façon à limiter le coefficient d'échange global a 0.36 W/ m. K

- Isolation des parois verticales et du plafond.

La construction de l'isolation des parois verticales et du plafond sera réalisé à l'aide des parois en sandwich constituées de :

- L'ossature de la chambre en béton.
- Face extérieure et intérieure en béton, dont les caractéristiques sont :
- Epaisseur : épaisseur calculé de Mousse de Polyuréthane (sandwich panel)
- Conductivité thermique équivalente  $\lambda_r = 0.027 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  [5]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_0}} = 0,36 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{I.1})$$

Pour une paroi de chambre froide on adopte :

- $\frac{1}{h_0} = 0.03 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- $\frac{1}{h_i} = 0.12 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- $\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j} = \frac{e_{\text{paroi}}}{\lambda_{\text{paroi}}}$

Donc l'épaisseur de l'isolant à mettre est :

$$e_{\text{isolant}} = 187,34 \text{ mm}$$

- Pour diminuer les échanges d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur, on installe du côté de la paroi un écran pare-vapeur dont la perméabilité doit être inférieure à :

- 1 g/m<sup>2</sup> pour les chambres positives.
- 0.002 g/m<sup>2</sup> pour les chambres négatives.

### Les panneaux du sol :

Les panneaux du sol doivent :

- avoir une résistance mécanique capable de supporter des charges de stockage et de roulement
- avoir une épaisseur de 50 cm de béton plein.
- avoir une légère pente d'écoulement pour permettre le nettoyage.

### Isolation des portes :

Les portes seront des panneaux en sandwich avec les caractéristiques suivantes :

- Dimensions : 2000x2000 mm
- Faces inférieures et extérieure en tôle en acier galvanisée laquée de 0.63mm de couleur blanche.
- Une âme isolante en mousse de polyuréthane, injectée entre les deux rôles de part et d'autre de la paroi de la chambre et possédant une densité de 40 kg/m<sup>3</sup> et une conductivité thermique de 0,027 W/m<sup>2</sup>.C

Les portes doivent comporter les accessoires suivants :

- des joints d'étanchéité
- un rideau d'air, commande par un contact de porte, qui évite que lors de l'ouverture des portes, de l'air froid et sec ne s'échappe par le bas et que l'air chaud et humide ne pénètre par le haut. Il sert aussi de barrière anti-insectes car il maintient une pression supérieure à l'air du local refroidi.

## I.4 Types des chambres froides

Il existe différents types de chambre froide : La chambre froide positive et la chambre froide négative aussi appelé vitrine réfrigérée. Alors que l'un sert à la conservation des produits, l'autre est utilisée pour congeler des aliments.

### I.4.1 Chambres froides positives [6]

Les chambres froides positives permettent le maintien des produits en dessous de la température ambiante à la température optimale pour sa conservation ; et ce au-dessus du point de congélation.

La durée de conservation est toujours limitée. Elle est fonction de la nature du produit et de la température à laquelle il est conservé dans la chambre froide.

Les calculs de températures sont établis pour une chambre froide positive de :

- En local de préparation froide, 10 à 12 °C.
- En local de réserve sèche, 16 à 20 °C.
- En chambre de réfrigération, 0 à 8 °C.
- En chambre de fruits et légumes, 7 à 15 °C.
- En local poubelle, 9 à 11 °C.

La conservation en chambre froide freine les phénomènes vitaux des tissus vivants, tels que ceux des fruits et légumes et des tissus morts (viandes, poissons) en ralentissant les métabolismes biochimiques. Elle va ralentir considérablement l'évolution microbienne et les conséquences de celle-ci (putréfaction, toxines,...).

#### **I.4.2 Chambre froide négative**

Pour congeler la viande et le poisson par exemple la chambre froide boucherie, donc négative, possède le même système de fonctionnement que la chambre réfrigérée positive. La seule différence, c'est que l'air soufflé est inférieur à une température de zéro degré. De ce fait, la chambre froide négative est utilisée pour congeler viande et poisson, mais également les produits laitiers. Une mauvaise conservation pourrait faire pourrir ou tourner le produit.[6]

### **I.5 Techniques de conservation [4]**

Les techniques de conservation par abaissement de la température des produits et des aliments permet de prolonger leurs durées de vie, et suivant les températures l'activité cellulaire et la prolifération des micro-organismes sont soit ralenties, soit stoppées. Le froid permet de conserver des aliments suivant les températures de quelques jours à plusieurs mois, tout en gardant leurs propriétés gustatives et nutritives.

#### **I.5.1 La réfrigération**

En maintenant des aliments à une température proche ou supérieure à 0°C ont réduit considérablement l'évolution microbienne et les métabolismes biochimiques. La conservation des denrées et aliments périssables dans une enceinte où la température et l'hygrométrie sont constantes est alors possible à court et moyen terme. Les aliments mis en conservation

doivent être sains, par exemple pour les fruits et légumes la réfrigération doit être faite le plus rapidement possible après la collecte.

### I.5.2 La congélation

Ce procédé permet de maintenir une température de  $-18^{\circ}\text{C}$  au cœur des aliments, les produits congelés peuvent être de la viande, des volailles, du poisson, des coquillages, du pain, du fromage et des plats cuisinés. Bien entendu, ils ne doivent pas avoir été congelés et décongelés au préalable. Une congélation rapide est une garantie de qualité, ce procédé provoque une cristallisation de l'eau contenue dans les aliments, si la congélation est trop lente les cristaux sont plutôt gros, ce qui après décongélation altère en grande partie la qualité du produit. Les températures des enceintes de congélations doivent être comprises entre  $-18^{\circ}\text{C}$  et  $-25^{\circ}\text{C}$ . [4]

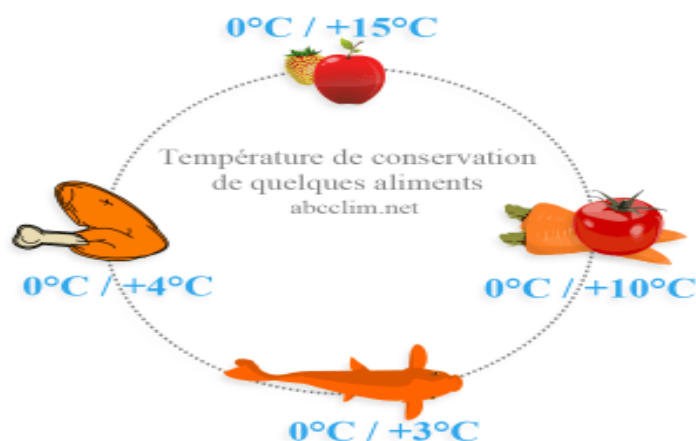
### I.5.3 La surgélation

La surgélation ou la congélation rapide consiste à exposer des produits à un froid intense de  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $-40^{\circ}\text{C}$  pendant un temps déterminé, cette pratique permet de garder la structure cellulaire originelle des produits et de bloquer l'activité microbienne. Ici contrairement à une congélation simple la proportion d'eau non congelée contenue dans le produit est très faible, les produits surgelés sont ensuite conservés à  $-18^{\circ}\text{C}$ .

## I.6 Conservation de quelques denrées [4]

**Viande :** La température de conservation de la viande varie de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $4^{\circ}\text{C}$  avec une hygrométrie comprise entre 75 et 85 %, une viande trop humide sera poisseuse tandis qu'une viande trop sèche perdra de son poids. Elle se conserve de plusieurs jours à quatre semaines au-delà il faudra congeler la viande, cette congélation doit être la plus rapide possible.

**Poisson :** La qualité de la viande de poisson se dégrade dès sa capture, celle-ci se conserve sur un lit de glace  $1^{\circ}\text{C}$ . Le poisson se conserve aux alentours d'une semaine entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $3^{\circ}\text{C}$ , au-delà il doit être mis en surgélation à  $-25^{\circ}\text{C}$ . En ce qui concerne les coquillages vivants leur conservation se situe entre  $6^{\circ}\text{C}$  et  $15^{\circ}\text{C}$ , une fois cuits ils peuvent être congelés.



**Figure.I.6** : Temperature de conservation de quelques aliments .[4]

**Fruits :** La conservation des fruits en chambre froide permet un entreposage prolongé, allant de trois à quatre mois. Les fruits une fois cueillis continuent d'absorber de l'oxygène et à dégager de l'anhydride carbonique, donc les chambres froides doivent être en mesure de contrôler non seulement la température, mais la teneur anhydride carbonique. La température de conservation et les fruits se situent de moins 0°C à +15°C avec une hygrométrie comprise entre 80% à 90 %. En ce qui concerne la conservation des produits congelés, la température se situe entre -20°C à 25°C.

**Les légumes:** La température de conservation des légumes varie 0°C à + 10°C avec une teneur en humidité relative de 70 à 90 %. La plupart des légumes peuvent être congelés, mais par exemple les pommes de terre, les artichauts, les aubergines, la laitue ne sont pas des aliments à congeler tels quels, ils doivent avoir été cuisinés au préalable.

## I.7 Conclusion

La recherche bibliographique et les différentes généralités de ce chapitre nous ont permis de découvrir et comprendre le monde de la conservation de denrées alimentaires par réfrigération.

## **Chapitre II**

# **Calcul des charges thermiques de la chambre froide**

## II.1 Introduction

La chambre froide étudiée dans ce mémoire de fin d'étude est située à TAMDA, dans l'établissement SNC METNA à 20 km de chef lieu de la wilaya de TIZI OUZOU. Elle est destinée à conserver les produits laitiers destinés à la distribution dans la région. Les produits conservés doivent être maintenus à une température moyenne de 6 °C, il s'agit des produits suivants :

- Yaourts
- Fromages
- Camemberts

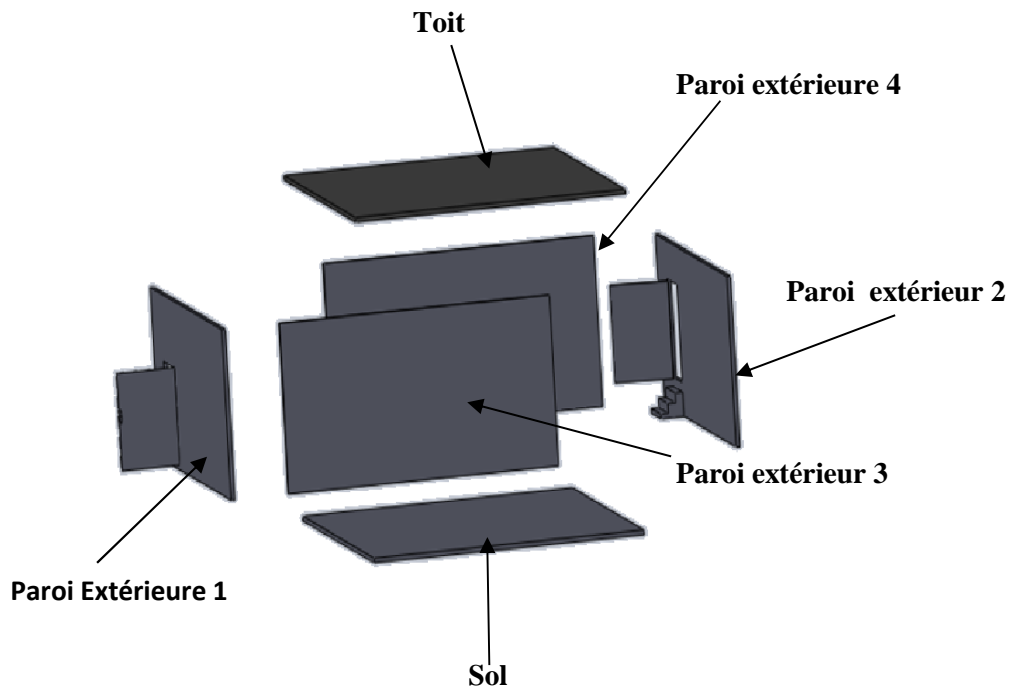
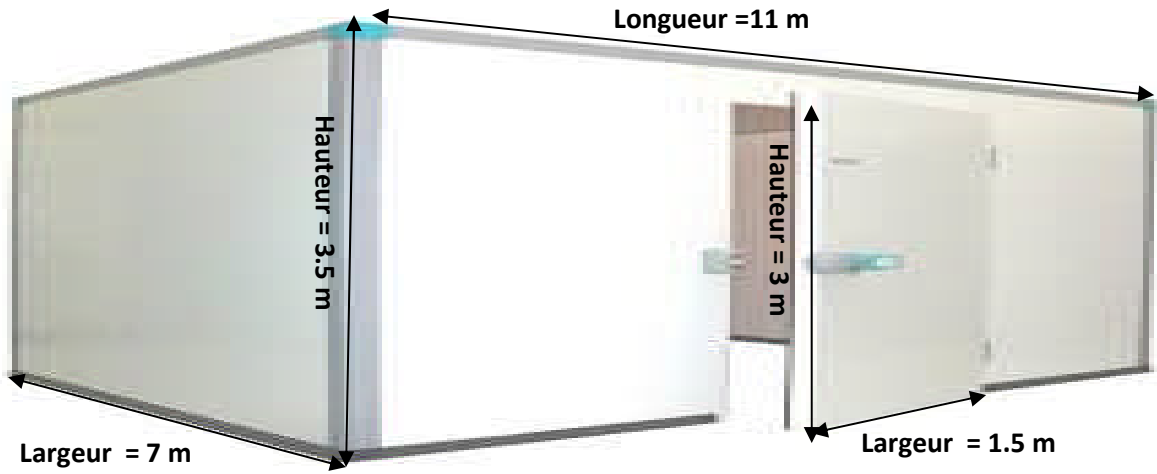
Le principal objectif de ce travail est d'explorer le champ de température et de vitesse à l'intérieur de cette chambre froide, bien sûr après avoir estimé la chambre froide (Figure II.1).

## II.2 Dimensions et caractéristiques de la chambre froide

Il s'agit d'une Chambre froide de 7 m de largeur et 11 m de longueur avec une hauteur de 3.5 m et 269.5 m<sup>3</sup> de volume qui servira à conserver des produits à une température qui varie entre 4°C à 8°C . Cette enceinte isolée est construite par assemblage des panneaux sandwich isolés par la mousse de polyuréthane de 100 mm d'épaisseur et un revêtement en tôle galvanisée. L'accès est assuré par deux portes isothermes pivotantes de 1.5 m de largeur et 3 m de hauteur avec fermeture automatique, décondamnation internes par poignée levier.

L'enceinte est équipée d'un système d'éclairage comprenant :

- point lumineux étanche.
- interrupteur à voyant lumineux.
- thermomètre de contrôle de la température interne.



**Figure II.1:** Dimensionnements et caractéristiques de la chambre froide

## II. 3 Calcul des charges thermiques externes

### II .3.1 Charges thermiques par transmission à travers les parois ( $Q_{tr}$ )

On procède à ce calcul paroi par paroi, d'abord les quatre parois verticales, puis le plancher haut et le plancher bas. La charge thermique par transmission est donnée par la relation suivante : [8]

$$Q_{tr} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad [\text{W}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$K$  : Coefficient de transmission thermique de la paroi considérée en  $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$

$S$  : Surface de la paroi considérée en  $\text{m}^2$

$\Delta t$  : Différence de température entre les deux cotés de la paroi considérée en  $\text{m}^2$

En ce qui concerne plus précisément les coefficients de transmission thermique  $K$  on a : [8]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=0}^n \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad (\text{II.2})$$

Avec

$\frac{1}{h_i}$  : Résistance thermique superficielle interne en  $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$

$\sum_{j=0}^n \frac{e_n}{\lambda_n}$  : La somme des résistances thermiques des différentes couches des matériaux constituant la paroi en  $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ . Chaque couche de matériau caractérisée par son épaisseur ( $e$ ) en  $[\text{m}]$  et par son coefficient de conduction thermique  $\lambda$  en  $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ .

$\frac{1}{h_e}$  : Résistance thermique superficielle externe en  $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ .

Les parois de la chambre froide sont isolées thermiquement, on tient compte dans les calculs que de la résistance thermique  $e/\lambda$  de l'isolant est :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad (\text{II.3})$$

Epaisseur d'isolant mm	Coefficient K W/m <sup>2</sup> K	Ecart de température conseillé K	Utilisation jusqu'à environ °C
50	0.39	20	-4
75	0.26	34	-10
100	0.19	45	-20
125	0.15	56	-30
150	0.13	70	-45

**Tableau II.1 : Coefficient de transmission thermique K d'une paroi sandwich composée d'une âme en mousse rigide de polyuréthane et deux revêtements métalliques. [7]**

D'après (tableau II .1) le coefficient de transmission thermique  $K = 0.19$  [W/m<sup>2</sup>.K], d'où les charges thermiques suivantes :

Pour la paroi extérieure 1 :

$$Q_{tr1} = K S \Delta t \quad [W]$$

$$Q_{tr1} = 0.19 \times (11 \times 3.5) \times (31 - 5) = 190.19 \text{ W}$$

Pour la paroi extérieure 2 :

$$Q_{tr2} = K S \Delta t \quad [W]$$

$$Q_{tr2} = 0.19 \times (11 \times 3.5) \times (11 - 5) = 43.89 \text{ W}$$

Pour la paroi extérieure 3 :

$$Q_{tr3} = K S \Delta t \quad [W]$$

$$Q_{tr3} = 0.19 \times (7 \times 3.5) \times (31 - 5) = 121.03 \text{ W}$$

Pour la paroi extérieure 4 :

$$Q_{tr4} = K S \Delta t \quad [W]$$

$$Q_{tr4} = 0.19 \times (7 \times 3.5) \times (11 - 5) = 27.93 \text{ W}$$

Pour le plafond :

$$Q_{tr,plafond} = K S \Delta t \quad [W]$$

$$Q_{tr,plafond} = 0.19 \times (7 \times 11) \times (31 - 5) = 380.38 \text{ W}$$

Pour le sol :

En ce qui concerne le sol de la chambre, il est réalisé sur terre- pleine sa constitution est donnée au (tableau II-3) son coefficient de transmission thermique est :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} \quad [W/m^2 \cdot K]$$

$$\frac{1}{h_i} = 0.06 [m^2 \cdot K/W] \text{ (comme indique au tableau II-3)}$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_n}{\lambda_n} = 3.6626 [m^2 \cdot K/W] \text{ (tableau II-2)}$$

$\frac{1}{h_e} = 0$  puisque le sol de la chambre froide est réalisé sur terre- pleine le mouvement d'air par convection en surface du sol est nul.

	<b>e</b> (mm)	<b>λ</b> (W/m. K)	<b>e/ λ</b> (m <sup>2</sup> .K/W)
<b>Pédale en béton sur terre –plein</b>	<b>0.15</b>	<b>1.279</b>	<b>0.1173</b>
<b>barrière d'étanchéité</b>	<b>0.015</b>	<b>0.16</b>	<b>0.0938</b>
<b>Isolant thermique (polystyrène)</b>	<b>0.10</b>	<b>0.030</b>	<b>3.333</b>
<b>Dalle de compression</b>	<b>0.10</b>	<b>1.279</b>	<b>0.0782</b>
<b>Chape</b>	<b>0.05</b>	<b>1.924</b>	<b>0.026</b>
<b>Pavage</b>	<b>0.015</b>	<b>1.05</b>	<b>0.0143</b>

**Tableau II.2 : Calcul de la résistance thermique des différentes couches de matériaux constituant le sol de la chambre froide. [7]**

Coté externe de la paroi	1/h <sub>e</sub>	Coté interne de la paroi	1/h <sub>i</sub>
Cas ou il est en contact avec l'air extérieur	0.03	Cas d'une chambre froide en ventilation mécanique	0.06
Cas ou il est en contact avec un autre local	0.12	Cas d'une chambre froide en ventilation naturelle	0.12

**Tableau II.3 : Résistances thermiques superficielles 1/h<sub>e</sub> en [m<sup>2</sup> K.W] des parois d'une chambre froide. [7]**

On a par conséquent :

$$K = \frac{1}{0.06+3.6626} = 0.269 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

En portant pour la terre pleine d'une température de 15 °C, la charge par le sol est :

$$Q_{tr,sol} = K.S.\Delta t$$

$$Q_{tr,sol} = 0.269 \times (11 \times 7) \times (15 - 5) = 207.13 \text{ W}$$

D'où la charge thermique totale due aux apports de chaleur par transmission à travers l'enveloppe de la chambre : [7]

$$Q_{tr,total} = Q_{tr1} + Q_{tr2} + Q_{tr3} + Q_{tr4} + Q_{tr,sol} + Q_{tr,plafond} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.4})$$

$$Q_{tr,total} = 190.19 + 43.89 + 121.03 + 27.93 + 380.38 + 207.13 = 970.55 \text{ W}$$

### II.3.2 Charges thermiques par renouvellement d'air ( $Q_{re}$ )

Dans de nombreuses chambres froides il est nécessaire de renouveler plus ou moins l'air ambiant, c'est-à-dire de remplacer une partie de l'air intérieur par l'air extérieur. La quantité d'air neuf admis, doit être refroidie de la température extérieure à la température de la chambre froide et constitue donc une charge thermique. [7]

$$Q_{re} = m_{ae} \cdot \Delta h \quad [\text{KW}] \quad (\text{II.5})$$

$$\Delta h = h_{ae} - h_{aa} \quad [\text{KJ/kg}] \quad (\text{II.6})$$

$m_{ae}$  = débit-masse d'air extérieur en Kg/s

$\Delta h$  = différence enthalpie entre l'air extérieur et l'air ambiant de la chambre froide en KJ/kg

$h_{ae}$  = l'enthalpie de l'air extérieur en KJ/kg

$h_{aa}$  = l'enthalpie de l'air ambiant en KJ/kg. [7]

On a :

$$m_{a,e} = \frac{V_{a,e} \cdot \varphi_{a,a}}{86400} \quad [\text{KJ/kg}] \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$V_{a,e}$  : Débit volume d'air extérieur en  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$\varphi_{a,a}$  : Masse volumique de l'air de la chambre froide en  $[\text{Kg}/\text{m}^3]$

$$\varphi_{a,a} = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{\varphi_0}{273,15}} \quad [\text{Kg}/\text{m}^3], \text{ la valeur } \varphi_0 \text{ étant prise égale à } 1,293 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

86400 = nombre de seconde dans une journée

Enfin pour le débit volume d'air extérieur (renouvellement d'air) on a :

$$V_{a,e} = V_{cf} \cdot n \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{II.8})$$

$V_{cf}$  = volume de la chambre froide en  $\text{m}^3$

$n$  = nombre de renouvellement d'air par 24 heures. [9] (Figure II.3)

$$n = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}} \quad (\text{II.9})$$

Longueur :  $L = 11 \text{ m}$

Largeur :  $l = 7 \text{ m}$

Hauteur :  $H = 3,5 \text{ m}$

Donc Le volume de la chambre froide est :

$$V_{cf} = 11 \times 7 \times 3,5 = 269,5 \text{ m}^3$$

Le taux journalier de renouvellement d'air :

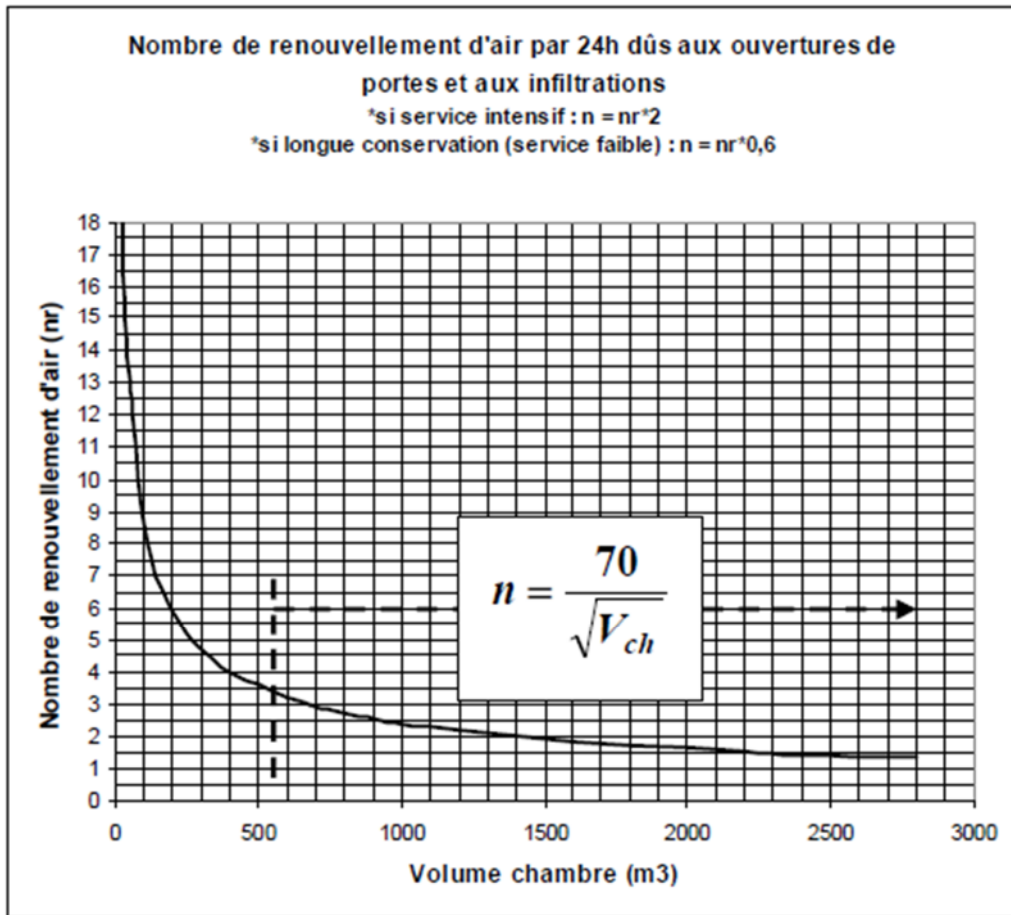


Figure II.2 : Nombre de renouvellement d'air par 24h. [9]

$$n = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}} = 4,26$$

On peut donc conclure que le débit- volume d'air neuf est :

$$V_{a,e} = 269,5 \times 4,26 = 1148,07 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

La masse volumique de l'air est :

$$\rho_{a,a} = \frac{1,293}{1 + \frac{5}{273,15}} = 1,269 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Valeur que l'on peut également lire approximativement sur (le diagramme de l'air humide) pour  $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$  un taux d'humidité correspondant à 64%



D'où le débit-masse d'air neuf :

$$m_{a,e} = \frac{1148,07 \times 1,293}{86400} = 0,01718 \text{ [Kg/s]}$$

Dans notre exemple, le renouvellement d'air provient de l'extérieur à la température de 31° C et un taux d'humidité 64 % d'après le diagramme de l'air humide.

$$h_{ae} = 78 \text{ [KJ/Kg]}$$

De même pour l'air de la chambre froide à 5°C et 80 % d'humidité relative.

$$h_{aa} = 11 \text{ [KJ/Kg]}$$

En a par conséquent :

$$\Delta h = 78 - 11 = 67 \text{ [KJ/Kg]}$$

La charge thermique par renouvellement d'air est alors

$$\begin{aligned} Q_{re} &= 0,01718 \times 67 = 1.1510 \text{ KW} \\ &= 1151.0 \text{ W} \end{aligned}$$

### II.3.3 Charges thermique par ouverture des portes ( $Q_{op}$ )

Dans le cas d'une chambre froide comportant une seule porte on calcul simplement la charge thermique par renouvellement d'air. Cependant si la chambre comporte plusieurs portes il faut calculer la charge thermique due à l'ouverture des portes. [7]

Pour une porte cette charge s'écrit :

$$Q_{op} = [8 + (0,067 \cdot \Delta t_p)] \cdot \tau_p \cdot \varphi_{aa} \cdot l_p \cdot h_p \cdot \sqrt{h_p \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{ae}}{\varphi_{aa}}\right)} \cdot (h_{ae} - h_{aa}) \cdot C_{ra} \text{ [W]} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$\Delta t_p = t_e - t_a \text{ en K}$$

$\Delta t_p$  : Ecart de température de l'air entre les deux cotés de la porte

$t_a$  : Température ambiante dans la chambre froide

$t_e$  : Température à l'extérieur

$\tau_p$  : Temps d'ouverture des portes exprimés en min /h

$\varphi_{aa}$  : Masse volumique de l'air ambiant dans la chambre froide en Kg/m<sup>3</sup>

$\varphi_{ae}$  : Masse volumique de l'air extérieur en Kg/m<sup>3</sup>

$l_p$  : Largeur de la porte en m

$h_p$  : Hauteur de la porte en m

$h_{ae}$  : Enthalpie de l'air extérieur calculée ou lue sur le diagramme de l'air humide

$h_{aa}$  : Enthalpie spécifique de l'air intérieur de la chambre froide, calculée ou lue sur le diagramme de l'air humide.

$C_{ra}$  : Coefficient de minoration dû à la présence éventuelle d'un rideau d'air, dans le cas d'une porte sans rideau  $C_{ra}= 1$  tandis que dans le cas d'une porte avec rideau  $C_{ra}=0.25$ .

Calcul du temps d'ouverture  $\tau_p$  des portes d'une chambre froide [7]

$$\tau_p = \frac{d_t \cdot f_i}{24} \quad [\text{min/ h}] \quad (\text{II.11})$$

$d_t$  : Durée moyenne d'ouverture des portes (aller et retour) pour permettre le passage des marchandises en minute par tonne (min/tonne). (Tableau II.4).

$f_i$  : Flux journalier des marchandises en tonne/jour. Le flux journalier de marchandises se détermine par expérience sur La base de la contenance totale de La chambre froide en kg.

Type de porte	$d_t$ min/ t
Porte à ouverture manuelle	6
Porte à ouverture automatique	0.8

**Tableau II.4 : Durée moyenne de transit de différents types de marchandises entreposées en chambre froide : [7]**

La contenance totale d'une chambre froide peut être calculée d'après la formule : [7]

$$C = A \cdot h \cdot d_e \cdot \eta_0 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$A$  : surface de la chambre froide en  $\text{m}^2$

$H$  : hauteur maximale de gerbage en m

$d_e$  : Densité d'entreposage en  $\text{Kg/m}^3$  (tableau II .5)

$\eta_0$  : Coefficient d'occupation au sol des marchandises (tenant compte des passages, des espacements a respecte entre les caisses – palettes ...etc.) en % (tableau II.6)

Marchandise concernée	$d_e$ kg/m <sup>3</sup>	Conditionnement
Amandes décortiquées	500	Sacs
Non décortiquées	350	Sacs
Bananes	250	Caisses bois
Beurre	300	Tonnelets
	1000	cartons
Cacao	450	sacs
Coquillage	400	bourriches
Farine	700	sacs
Fromage	500	caisses
Lait	800	caisses
Maïs	700	sacs
Huile	650	tonneaux
Miel	900	tonneaux
œufs	350	caisses

Tableau II.5 : Densités d'entreposages de différentes marchandises : [7]

Type d'entreposage	$\eta_o$
Entreposage de marchandises réfrigérées palettisées à faible rotation	0.65 - 0.40
Entreposage de marchandises réfrigérées palettisées à rotation rapide	0.45 - 0.50
Entreposage de marchandises congelées palettisées à faible rotation	0.75 - 0.80
Entreposage de marchandises palettisées congelées à rotation rapide	0.50 - 0.60

Tableau II.6 : Coefficient d'occupation du sol d'une chambre froide en fonction du type d'entreposage des marchandises : [7]

D'où les charges thermiques par ouverture des portes  $Q_{op}$  :

$$Q_{op} = [8 + (0,067 \cdot \Delta t_p)] \cdot \tau_p \cdot \varphi_{aa} \cdot l_p \cdot h_p \cdot \sqrt{h_p \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{ae}}{\varphi_{aa}}\right)} \cdot (h_{ae} - h_{aa}) \cdot C_{ra}$$

On a :

$$\Delta t_p = 26 \text{ °C}$$

$$\varphi_{aa} = 1,269 \text{ Kg/m}^3$$

$$l_p = 1.5 \text{ m}$$

$$h_p = 3 \text{ m}$$

$$\varphi_{ae} = 1.1396 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_{ae} = 78 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{aa} = 11 \text{ KJ/Kg}$$

$$C_{ra} = 0.25 \text{ car les portes sont équipées d'un rideau.}$$

Pour ce qui est présent de la valeur, nous allons commencer par déterminer la contenance C on a : [7]

$$C = A \cdot h \cdot d_e \eta_0 \text{ [Kg]}$$

$$A = 77 \text{ m}^2$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$d_e = 500 \text{ kg/m}^3 \text{ (tableau II.5, en prenant la même valeur que pour le lait réfrigéré)}$$

$$\eta_0 = 0,5 \text{ (pour les marchandises réfrigérées palettisées à rotation rapide) (Tableau II.6) :}$$

$$C = 38500 \text{ Kg}$$

Etant donné le type de la chambre froide dont il s'agit, on peut raisonnablement estimer que chaque jour la respiration de la marchandise, 25% de la capacité de stockage soit dans notre cas :

$$38500 \times 25 = 9625 \text{ Kg}$$

Cette valeur représente le flux journalier de marchandises  $f_i$  soit 9.625 t/j

Les porte de la chambre sont du type a commande automatique le (tableau 1.4) indique la durée moyenne d'ouverture des portes  $d_t = 0.8 \text{ min / t}$ .

D'où le temps d'ouverture des portes :

$$\tau_p = \frac{9.625 \times 0.8}{24} = 0.320 \text{ [min / h]}$$

La charge thermique par ouvertures des portes est alors : [7]

$$Q_{op} = [8 + (0.067 \times 26)] \times 0.32 \times 1.269 \times 1.5 \times 3 \times \sqrt{3 \left(1 - \frac{1.1396}{1.269}\right)} \times (78 - 11) \times 0.25$$

$$Q_{op} = 164,92 \text{ W}$$

## II.4 Calcul des charges thermiques internes

### II.4.1 Charges thermiques internes indépendantes des denrées entreposées

#### II.4.1.1 Charges thermiques dues à l'éclairage [7]

La charge thermique due à l'éclairage se calcule d'après la formule suivante :

$$Q_{ec} = \frac{i \cdot P \cdot t}{24} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.13})$$

Avec

$i$  : Nombre de lampes

$P$  : Puissance de chaque lampe en W

$t$  : Durée de fonctionnement des lampes

24 : nombre d'heures dans une journée

Déterminons la charge thermique due à l'éclairage sachant que la chambre est éclairée par 2 lampes fluorescentes dont la puissance de 50 W pour chaque lampe et qu'elles fonctionnent 8 heures par jour.

$$Q_{ec} = \frac{2 \times 50 \times 8}{24} = 33.33 \text{ W}$$

#### II.4.1.2 Charges thermiques dues aux personnes ( $Q_{pe}$ ) [6]

La charge thermique due aux personnes se calcule d'après la formule :

$$Q_{pe} = \frac{i \cdot q_p \cdot t}{24} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.14})$$

Avec

$i$  : Nombre de personnes opérant dans la chambre froide

$q_p$  : Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne en activité moyenne dans une chambre froide en W (Tableau II.7).

$t$  : Durée de présence de chaque personne dans la chambre froide.

Déterminons la charge thermique due aux personnes sachant que dans le cas de notre chambre froide, le nombre de personnes qui travaillent est 3 personnes et ils travaillent 8 heures par jour.

Température de la chambre froide °C	Quantité de chaleur dégagée par personne et unité de temps $q_p$ [W]
20	180
15	200
10	210
5	240
0	270
-5	300
-10	330
-15	360

**Tableau II .7 : Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par personne en activité moyenne dans une chambre froide. [7]**

On a :

La température ambiante de la chambre étant de 5 °C la quantité de chaleur dégagée par personne et par unité de temps est, d'après le (tableau II.7). [6]

$$q_p = 240 \text{ W}$$

On a par conséquent :

$$Q_{pe} = \frac{3 \times 240 \times 8}{24} = 240 \text{ W}$$

#### II.4.1.3 Charges thermiques dues aux matériels roulants ( $Q_{mr}$ ) [6]

Ce matériel roulant est plus souvent constitué de chariots élévateur et transpalettes On a :

$$Q_{mr} = \frac{i \times P \times t}{24} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$i$  : Nombre de personnes opérant dans la chambre froide

$P$  : Puissance totale de chaque type de matériel roulant en W

$t$  : Durée de fonctionnement du matériel roulant. [6]

Dans notre cas n'est pas prévu d'engin de transport motorisé, mais seulement des transpalettes manuels on a donc :

$$Q_{mr} = 0 \text{ W}$$

#### II.4.1.4 Charges thermiques dues aux machines diverses ( $Q_{md}$ ) [6]

Ces machines peuvent être très diversifiées : étuves, cutters, hachoirs .....etc.

$$(Q_{md}) = \frac{i.P.\dot{d}}{24} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.16})$$

$i$  : Nombre de machine d'un type donné.

$P$  : Puissance de chaque type de machine en [W]

$\dot{d}$  : Durée de fonctionnement chaque type de machine en h/j

Dans notre chambre froide il n'y a aucune machine particulière, on a par conséquent :

$$Q_{md} = 0 \text{ W}$$

#### II.4.1.5 Charges thermiques dues aux moteurs des ventilateurs des évaporateurs ( $Q_{vent}$ ) [7]

Dans la chambre froide moderne, on utilise toujours des évaporateurs équipés d'un ou plusieurs ventilateurs ce qui permet d'assurer un brassage et une circulation efficace de l'air. Chaque ventilateur est entraîné par un moteur électrique qui dégage de la chaleur qui s'ajoute à la chaleur dégage par les différentes autres sources.

La charge due aux moteurs des ventilateurs est alors donnée par la formule : [7]

$$(Q_{vent}) = \frac{n.P.\tau_{evap}}{\tau_{inst}} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$n$  : Nombre de moteur de ventilateurs

$P$  : Puissance du ventilateur considérés en W

$\tau_{evap}$  : durées de fonctionnement des ventilateurs en h/24

$\tau_{inst}$  : Durée de marche de l'installation frigorifique en h/24

Dans notre cas l'évaporateur a 3 ventilateurs, on supposant que la durée de fonctionnement des ventilateurs est 16 h, et la puissance de chaque ventilateur est 60 W.

D'où :

$$(Q_{vent}) = \frac{3 \times 60 \times 16}{16} = 180 \text{ W}$$

## II.4.2 Charges thermiques internes dépendantes des denrées entreposées [7]

### II.4.2.1 Charges thermiques dues aux denrées entrantes ( $Q_{de}$ ) [7]

Cette charge résulte du fait que les produits introduits dans la chambre froide sont toujours à une température supérieure à celle de la chambre et qu'ils dégagent une quantité de chaleur.

$$Q_{de} = \frac{m \cdot c_1 (t_1 - t_2)}{86400} \quad [\text{KW}] \quad (\text{II.18})$$

Avec

m : Masse de denrées introduite chaque jour en Kg

$c_1$  : Capacité thermique massique moyenne entre  $t_1$  et  $t_2$  de chaque type de denrées introduite en [KJ/Kg. °C] (Tableau II.8).

$t_1$  : Température initiale de la denrée introduite en °C

$t_2$  : Température de réfrigération de la denrée introduite en °C

86400 = nombre de seconde dans une journée.

Denrée	Température en °C								
	0	1	3	5	7	10	12	15	17
Beurre	93	95.5	102	108	115	126	134	147	156
Fromage blanc	246	249	256	263	270	281	288	298	306
Fruits	272	275	283	291	298	309	317	328	336
Lait condensé	21.8	23.9	28.5	32.7	36.8	43.5	47.7	54.4	59
Bœuf et volaille	232	236	242	248	255	265	271	280	287

Tableau II.8 : Enthalpie massique en KJ/kg de denrée en chambre froide : [7]

On sait que d'après les tableaux, le fromage blanc est introduit dans la chambre froide à la température (10°C) et la température de la chambre froide est 5°C et que sa capacité thermique massique moyenne est égale à (263 KJ/kg)

Donc

$$Q_{de} = \frac{8000 \times 263 \times 5}{86400} = 121.75 \text{ KW}$$

$$Q_{de}=121750 \text{ W}$$

## II.5 Puissance frigorifique intermédiaire de l'évaporateur ( $Q_{o,int}$ )

Arrivé à ce stade de calcul, il est nécessaire de déterminer la puissance frigorifique intermédiaire  $Q_{o,int}$  que le ou les évaporateurs devront assurer afin de couvrir la charge thermique intermédiaire  $Q_{int}$  somme des différentes charges frigorifiques intermédiaires. Ensuite, il est utile de déterminer la puissance frigorifique prévisionnelle  $Q_{o,int}$ . [7]

La charge thermique intermédiaire est :

$$Q_{int} = Q_{tr} + Q_{er} + Q_{op} + Q_{ec} + Q_{pe} + Q_{mr} + Q_{md} + Q_{de} + Q_{vent} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.19})$$

Si l'on désigne par  $\tau_{inst}$  la durée de fonctionnement de l'installation frigorifique, La puissance frigorifique intermédiaire de l'évaporateur est alors

$$Q_{o,int} = \frac{Q_{int} \times 24}{\tau_{inst}} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.20})$$

$$Q_{int} = 970.55 + 1151 + 164.93 + 33.33 + 240 + 121750 + 180 = 124489,81 \quad [\text{W}]$$

$$Q_{int} = 124,48981 \quad [\text{KW}]$$

Si l'on fixe la durée journalière de fonctionnement de l'installation à 16 heures la puissance frigorifique intermédiaire de l'évaporateur est alors :

$$Q_{o,int} = \frac{124489.81 \times 24}{16} = 186734.71 \quad [\text{W}]$$

## II.6 Conclusion

Pour une conservation des produits à grande échelle, la méthode de traitement et de conservation par réfrigération reste la plus utilisée. Les produits peuvent rester durant des semaines dans des conditions acceptables. Cependant cette réfrigération est freinée par deux facteurs majeurs: le cout élevé et la qualité des moyens d'entreposage et de transport, notamment les chambres froides.

**Chapitre III**

**FORMULATIONS MATHÉMATIQUES DES**  
**EQUATIONS DES CHAMPS DE VITESSE ET DE**  
**TEMPERATURE**

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'écoulement d'air à partir de l'évaporateur pour le refroidissement de la chambre froide. L'étude de n'importe quel phénomène physique passe par la formulation des lois sous forme d'équations mathématiques reliant les différentes variables intervenant dans le développement du phénomène. En général, ces équations sont : L'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement (équations de Navier Stokes) et l'équation d'énergie.

### **III.1 Notions sur les écoulements**

L'écoulement d'un fluide est dit permanent si les champs des vecteurs vitesses des particules fluides est constant dans le temps. Notons cependant que cela ne veut pas dire que le champ de vectrices vitesses est uniforme dans l'espace. L'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible est le seul que nous aurons à considérer dans notre travail. [12]

#### **III.1.1 Nombre de Reynolds**

Nombre de Reynolds noté  $Re$ , représente le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux. Il définit la nature laminaire, transitoire ou turbulente d'un écoulement. Un écoulement laminaire est caractérisé par de faibles nombres de Reynolds, et par les effets d'inerties faibles devant les effets visqueux. Un écoulement turbulent est caractérisé par des effets visqueux négligeables devant les effets d'inertie. Le nombre de Reynolds généralisé est défini par l'équation :

#### **III .1.2 Régimes d'écoulement [12]**

- **Régime laminaire :**

L'écoulement laminaire se produit lorsqu'un fluide s'écoule en couches parallèles, sans interruption entre les couches. À de faibles vitesses, le fluide tend à s'écouler sans mélange latéral, et les couches adjacentes glissent l'une après l'autre comme des cartes à jouer. Il n'y a pas de courants transversaux perpendiculaires à la direction d'écoulement, ni les tourbillons de fluides.

Dans l'écoulement laminaire, le mouvement des particules du fluide est très ordonné avec des particules proches d'une surface solide se déplaçant en lignes droites parallèles à cette surface. Le flux laminaire est un régime d'écoulement caractérisé par une forte diffusion d'impulsion et une faible convection de quantité de mouvement. Pour un écoulement laminaire le nombre de Reynolds est :  $Re < 2000$

### Écoulement laminaire

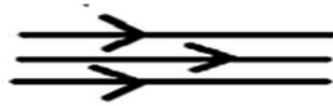


Figure III .1 : Écoulement laminaire

- **Régime transitoire :**

C'est une transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. En physique, un régime transitoire est le régime d'évolution d'un système qui n'a pas encore atteint un état stable ou le régime établi. Un régime transitoire peut apparaître lors d'une modification d'un système.

- **Régime turbulent :**

L'écoulement turbulent est un régime d'écoulement dans la dynamique des fluides caractérisé par des changements chaotiques de la pression et de la vitesse d'écoulement. Il est contraire à un régime d'écoulement laminaire, qui se produit lorsqu'un fluide s'écoule en couches parallèles, sans interruption entre ces couches. Pour un écoulement turbulent le nombre de Reynolds est :  $Re > 2000$ .

### Écoulement turbulent



Figure III .2 : Écoulement turbulent

## III.2 Les couches limites

Lorsqu'un fluide réel s'écoule le long d'une paroi supposée fixe, les vitesses sur la paroi sont nulles et à l'infini, loin de l'obstacle, elles sont égales à la vitesse de l'écoulement non perturbé. Sur une normale à la paroi la vitesse doit donc dans tous les cas varier entre 0 et un maximum.

La loi de variation dépend de la viscosité du fluide qui induit un frottement entre les couches voisines : la couche la plus lente tend à freiner la couche la plus rapide qui, en retour, tend à l'accélérer. Dans ces conditions, une forte viscosité égalise au maximum les vitesses. Au contraire, si le fluide est peu visqueux, les différentes couches sont beaucoup plus indépendantes : la vitesse à l'infini se maintient jusqu'à une courte distance de l'obstacle et il y a une variation plus forte des vitesses dans la petite épaisseur de la couche limite. [12]

### III.3 Formulations mathématiques [10]

Les équations qui régissent l'écoulement d'un fluide incompressible Newtonien sont l'équation de continuité et les équations de conservation de quantité de mouvement :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \times \text{div}\vec{U} = 0 \quad (\text{III.1})$$

- **Equations de quantité de mouvement :**

Elles s'appellent aussi les équations de Navier Stokes et elles traduisent la loi fondamentale de la dynamique, elles s'écrivent comme suit :

$$\rho \frac{d\vec{u}_i}{dt} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \text{div}\vec{U}) + \text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}} U_i) + \text{div}(\mu \frac{\partial \vec{U}}{\partial x_i}) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$\mu$  : viscosité dynamique.

$\rho$  : masse volumique du fluide.

$\vec{U}$  : Vecteur vitesse de l'écoulement.

$f_i$  : force de volume.

- **Equation d'énergie :**

$$\rho C_P \frac{dT}{dt} = \text{div} (\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \quad (\text{III.3})$$

$C_P$  = Chaleur spécifique de l'air.

$\overrightarrow{\text{grad}} T$  = gradient de température.

$\lambda$ : conductivité thermique

La projection des équations (Navier stocks) sur les axes  $ox$ ,  $oy$  et  $oz$  donne :

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} \vec{U}) + \operatorname{div}(\overrightarrow{\mu \operatorname{grad} u}) + \operatorname{div}(\mu \frac{\partial \vec{U}}{\partial x}) \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dv}{dt} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \operatorname{div} \vec{U}) + \operatorname{div} \operatorname{div}(\overrightarrow{\mu \operatorname{grad} v}) + (\mu \frac{\partial \vec{U}}{\partial y}) \quad (\text{III.5})$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \operatorname{div} \vec{U}) + \operatorname{div}(\overrightarrow{\mu \operatorname{grad} w}) + \operatorname{div}(\mu \frac{\partial \vec{U}}{\partial z}) \quad (\text{III.6})$$

Pour le développement de ses équations on adapte les simplifications suivantes :

$$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\overrightarrow{\operatorname{Grad} U} = \frac{\partial u}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{k}$$

$$\operatorname{div} \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Reportons-les dans les équations projetées sur les axes et on aura :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{3} \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

En tenant compte des hypothèses suivantes :

Les forces du volume  $f_x$ ,  $f_y$  et  $f_z$  sont nulles.

Le régime de l'écoulement est supposé permanent  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ .

Écoulement incompressible  $\operatorname{div} \vec{U} = 0$ .

D'où les nouvelles équations sous formes développées :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.10})$$

- **Equations de Navier Stokes :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.11})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.12})$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.13})$$

- **Equation d'énergie :**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} : \text{diffusivité thermique.}$$

### III. 4 Adimensionnalisation des équations du mouvement

L'analyse de la géométrie du problème montre l'existence des domaines d'écoulement d'échelles géométriques différentes. On distingue les directions (ox, oy et oz) où le fluide évolue respectivement sur des échelles de l'ordre de la longueur L, la largeur  $\ell$  et la hauteur h de la chambre froide.

Les échelles de vitesse associées aux différentes directions sont différentes :

- U suivant ox
- V suivant oy
- W suivant oz

U : module de la vitesse à l'infini est une donnée qui inspire le choix des échelles pour u, v et w.

De là on peut introduire la définition des variables sans dimension suivantes :

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{\ell} \quad \text{et} \quad \bar{z} = \frac{z}{h}$$

$$\bar{u} = \frac{u}{U}, \quad \bar{v} = \frac{v}{V} \quad \text{et} \quad \bar{w} = \frac{w}{W}$$

$$\bar{P} = \frac{P}{\Delta P} \quad \frac{h}{L} = 0,32$$

Par conséquent les équations de continuité et de Navier Stokes deviennent :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{LV}{U\ell} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \frac{LW}{Uh} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (\text{III.15})$$

Le Principe de moindre dégénérescence appliqué à cette relation (III.15) nous donne :

$$\frac{LV}{U\ell} = 1 \Leftrightarrow V = \frac{\ell}{L} \cdot U = \frac{7}{11} U = 0,64 \cdot U$$

$$\frac{LW}{Uh} = 1 \Leftrightarrow W = \frac{h}{L} \cdot U = \frac{3,5}{11} U = 0,32 \cdot U$$

- **Equation de Navier Stokes projetée suivant l'axe ox :**

$$\bar{u} \frac{U^2}{L} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{VU}{\ell} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{WU}{h} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \nu \left[ \frac{U}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{U}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{U}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.16})$$

- **Equation de Navier Stokes projetée suivant l'axe oy :**

$$\bar{u} \frac{UV}{L} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{V^2}{\ell} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{WV}{h} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{z}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\ell} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \nu \left[ \frac{V}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{V}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{V}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.17})$$

- **Equation de Navier Stokes projetée suivant l'axe oz :**

$$\bar{u} \frac{UW}{L} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{VW}{\ell} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{W^2}{h} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{h} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} + \nu \left[ \frac{W}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{W}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{W}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.18})$$

En divisant les équations par  $\left(\frac{L^2}{U}\right)$  qui représente l'inertie de l'écoulement à l'infini, et en posant  $\frac{1}{Re} = \frac{\nu}{UL}$  on obtient les équations de Navier Stokes projetées sur les axes suivants :

- **Selon l'axe ox :**

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\Delta P}{\rho U^2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{Re} \left[ 1 \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + 2,47 \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} + 9,877 \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.19})$$

- **Selon l'axe oy :**

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\Delta P}{\rho U^2} 2,47 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \frac{1}{Re} \left[ 1 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + 2,47 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} + 9,877 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.20})$$

- **Selon l'axe oz :**

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\Delta P}{\rho U^2} 9,877 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} + \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + 2,47 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{y}^2} + 9,877 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z}^2} \right] \quad (\text{III.21})$$

### III. 5 Adimensionnalisation de l'équation d'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

On introduit la variable sans dimension  $\bar{T}$  :

Avec:

$$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_e - T_0} \quad \Rightarrow \quad \bar{T} (T_e - T_0) = T - T_0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = (T_e - T_0) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{(T_e - T_0)}{L} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (T_e - T_0) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} = \frac{(T_e - T_0)}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2}$$

$T_0$ : Température ambiante.

$T_e$ : Température de l'enceinte.

$T$ : Température ponctuelle.

Selon l'axe  $ox$  :

$$(T_e - T_0) \left( \frac{\bar{u}U}{L} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \frac{\bar{v}V}{\ell} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{w}W}{h} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} \right) = \alpha (T_e - T_0) \left( \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.22})$$

$$\frac{\bar{u}U}{L} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \frac{\bar{v}V}{\ell} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{w}W}{h} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \alpha \left( \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.23})$$

$$\frac{\bar{u}U}{L} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \frac{\bar{v}}{\ell} \frac{\ell}{L} U \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{w}}{h} \frac{h}{L} U \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \alpha \left( \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.24})$$

En multipliant l'équation (III.24) par  $\left(\frac{L}{U}\right)$  on obtient :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{\alpha L}{U} \left( \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.25})$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{\alpha L^2}{UL} \left( \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.26})$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{\alpha}{UL} \left( \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{L^2}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{L^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (\text{III.27})$$

On a:  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{\lambda}{\frac{\mu}{v} c_p} = \frac{\lambda v}{\mu c_p}$  et  $\frac{1}{Re} = \frac{v}{UL}$

D'où :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{\lambda v}{\mu c_p} \frac{1}{UL} \left( \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{L^2}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{L^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (III.28)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{\lambda}{\mu c_p} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{L^2}{\ell^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{L^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (III.29)$$

Pour un nombre de Reynolds très important :

$$Re = \frac{UL}{v} = \frac{3 \cdot 11}{0,15 \cdot 10^{-4}} = \frac{33}{0,15} 10^4 = 2,2 \cdot 10^6$$

Le terme de la droite de l'équation (III.29) est négligeable.

Finalement on aura :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (III.30)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = 0 \Rightarrow \bar{T} = \text{cte}$$

$$\frac{T - T_0}{T_e - T_0} = A = \text{cte} \Rightarrow T - T_0 = A (T_e - T_0)$$

$$T = A (T_e - T_0) + T_0 \Rightarrow A = \text{cte} = 1$$

$$\Rightarrow T \simeq T_e$$

### III. 6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir les équations régissant l'écoulement de l'air à l'intérieur de la chambre froide en coordonnées cartésiennes. L'adimensionnalisation des équations, de plus en introduisant les formes générales des solutions, nous ont permis de découvrir et suivre l'évolution de la température dans enceinte froide.

## **Chapitre IV**

# **MESURES EXPERIMENTALES DE LA TEMPERATURE A L'INTERIEUR DE LA CHAMBRE FROIDE**

L'objectif de ce chapitre est de disposer d'une banque de données expérimentales permettant de prédire les évolutions de la température à l'intérieur d'une chambre froide. La première partie est consacrée à la description de l'instrumentation de mesure du champ de température, dans le sens longitudinal, transversal et suivant la hauteur de la chambre froide. Les résultats de différents tests expérimentaux sont présentés afin d'appréhender la sensibilité de la variation de la température.

## IV.1 Descriptif de l'expérimentation

Un flux d'air frais est soufflé par un évaporateur à une température de « 6 °C » d'un débit d'air 5150[m<sup>3</sup>/h] et une vitesse de (3 m/s). Des mesures ont été prises à travers 4 plans, trois plans transversaux à différentes positions respectives: (plan à x=2,75 m, plan à x = 5,5m, plan à x = 8,25 m), le quatrième plan est longitudinal au milieu de la chambre froide. Pour chaque plan la prise des températures superficielles (les parois verticales et horizontales) se fait avec un thermomètre infrarouge en se déplaçant avec un pas (x= 50 cm). Pour les températures spatiales les mesures ont été effectuées avec un thermocouple numérique se déplaçant avec l'abscisse (x= 50 cm) suivant l'horizontale et la verticale afin de connaître l'évolution de la température à l'intérieur de la chambre froide, comme nous montre la figure suivante.

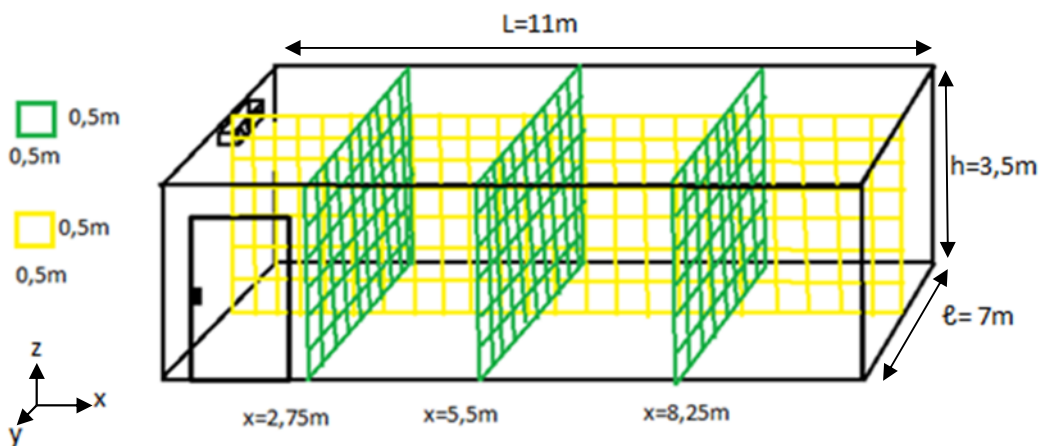


Figure IV.1: Plans transversaux et longitudinale

## IV.2 Instrumentation de mesures

### IV. 2.1 Thermomètre infrarouge [11]

Ce thermomètre infrarouge numérique est compact et facile à utiliser. C'est un article très utile pour mesurer la surface des objets chauds, dangereux ou difficiles à atteindre sans avoir à les toucher. Il suffit de viser, d'appuyer sur le bouton, et de lire la température en moins d'une seconde. Le thermomètre infrarouge mesure la température de surface d'un objet. Le sens optique de l'unité émet, réfléchit et transmet l'énergie qui est collectée et focalisé sur un détecteur.

L'électronique de l'unité traduit les informations en une lecture de température qui est affichée sur l'écran LCD pour une plus grande facilité et précision, la visée est encore plus précise.

-Ecran LCD avec retro éclairage.

-Conversion de l'unité de température C/F.

-Maintenance de l'affichage, fonction scan. (voir l'annexe 4) :



Figure IV.2 : Photo d'un thermomètre infrarouge

### IV.2.2 Thermocouple numérique [15]

C'est un dispositif formé par deux jonctions soudées à l'extrémité chaude, la sonde est recouverte d'une mèche en coton et sera installé dans le milieu dont la température est à mesurer. Les extrémités froides des deux fils métalliques étant raccordées aux bornes de l'appareil électrique (voltmètre) de mesure, le montage électronique assure la lecture directe de la température sous forme digitale. (voir l'annexe 3)



Figure IV.3: Photo d'un thermocouple numérique

### IV.3 Séquences de mesures

Ayant effectué des mesures sur le plan transversal et longitudinal à l'aide d'un thermomètre infrarouge et un thermocouple numérique, les résultats obtenus sont présentés comme suit :

#### IV.3.1 Plans transversaux

Des mesures de température ont été effectuées à l'intérieur de la chambre froide, afin de connaître l'évolution de la température suivant les plans transversaux à différentes positions.

##### IV. 3.1.1 Plan transversal à $x=1/4 L = 2,75 \text{ m}$

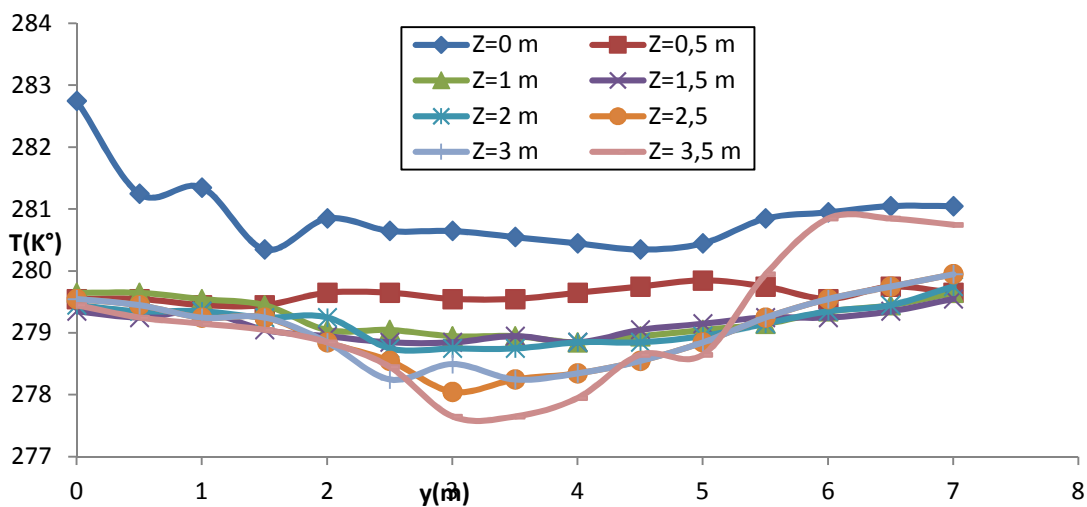


Figure IV.4: Evolution de la température dans le plan transversal  $x=1/4L= 2,75 \text{ m}$ .

A partir du diagramme on remarque que la température au niveau du sol se distingue par rapport aux autres hauteurs, étant trop élevée sur l'ensemble de la chambre, les autres températures diminuent en se rapprochant du toit, ou on inscrit les températures les plus basses ; les hauteurs moyennes nous donnent des valeurs rapprochées entre elles sur les cotés de la chambre du fait que le conditionnement provient du milieu du toit.

IV.3.1.2 Plan transversal à  $x=2/4 L= 5,5$  m.

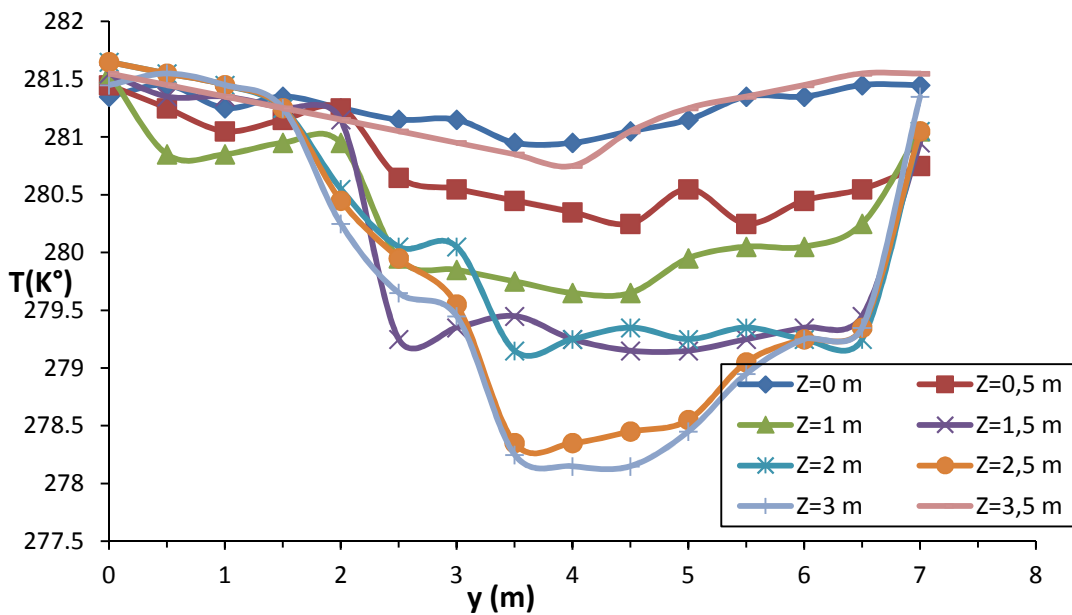


Figure IV.5: Evolution de la température dans le plan transversal  $x=2/4 L= 5,5$  m.

Dans la figure (IV.5), on remarque une fluctuation des températures ( $\pm 0.5$  ° C) du mur gauche jusqu'à  $y = 1.5$  m, une décroissance importante a été observée à différentes hauteurs de ( $z=0.5$  m à  $z=3$ m) en fonction de ( $y$ ), conséquence de l'écoulement de l'air, une fluctuation légère au niveau du toit et du sol, à partir de ( $y=5$  m) on observe une croissance des températures jusqu'à ce qu'elles atteignent une valeur moyenne de  $281.5$  °K .

IV.3.1.3 Plan transversal à  $x= 3/4 L= 8,25$  m.

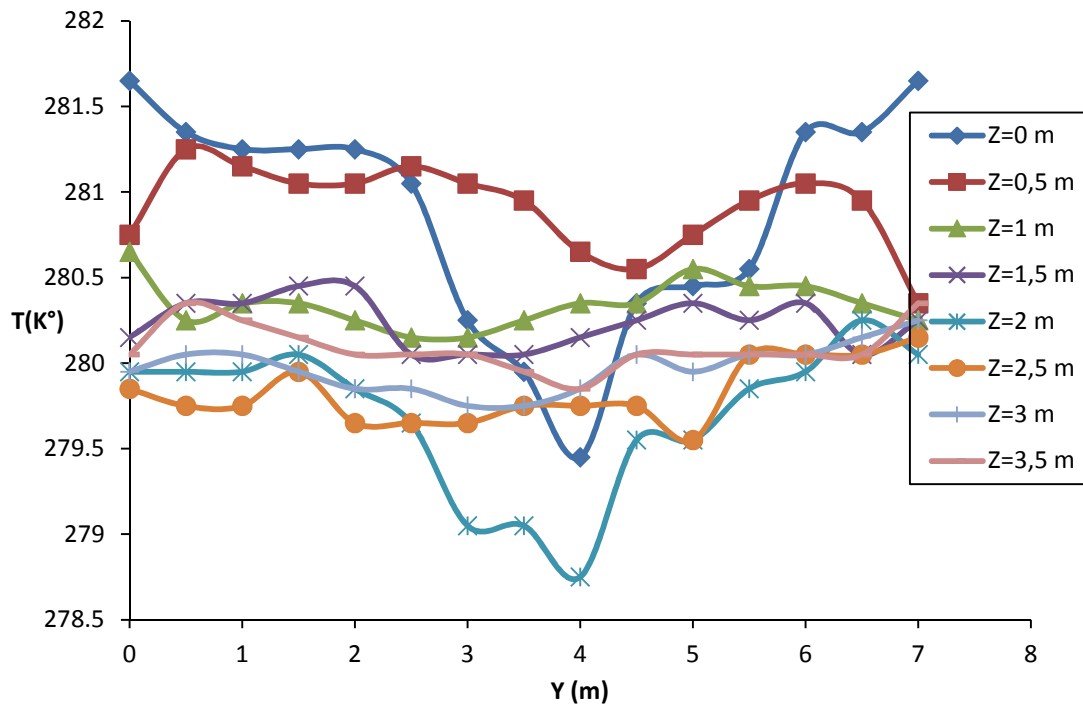


Figure IV.6: Evolution de la température dans le plan transversal  $x= 3/4 L= 8,25$  m.

Dans la figure (IV.6), nous remarquons que les températures varient entre (279.7 °K et 280.5°K) à différentes positions de ( $y=0$  m à  $y=2.5$  m ) et des hauteurs ( $z=1$  m à  $z= 3.5$  m), des perturbations étaient observées à deux différentes hauteurs ( $z=0$ m,  $z=0.5$ m), conséquence de présence du produit à conserver. On constate que la présence du produit provoque des augmentations de température par la chaleur dégagée par ce dernier, et à partir de ( $y = 2.5$  m), une décroissance importante au niveau du sol ( $z = 0$  m) et ( $z = 2$  m), l'absence du produit permet de diminuer les températures dans les différentes positions ( $y= 2.5$  m à  $y= 5$ m). Lorsque on se rapproche du mur droit, nous remarquons une liaison des températures mesurées en rapport avec les hauteurs choisies, jusqu'à ce qu'elles atteignent une température moyenne de 280.7 ° K.

IV.3.2 Plan longitudinal

Des mesures ont été effectuées afin de connaître la variation de la température. Les températures mesurées sont présentées sur la figure IV.6.

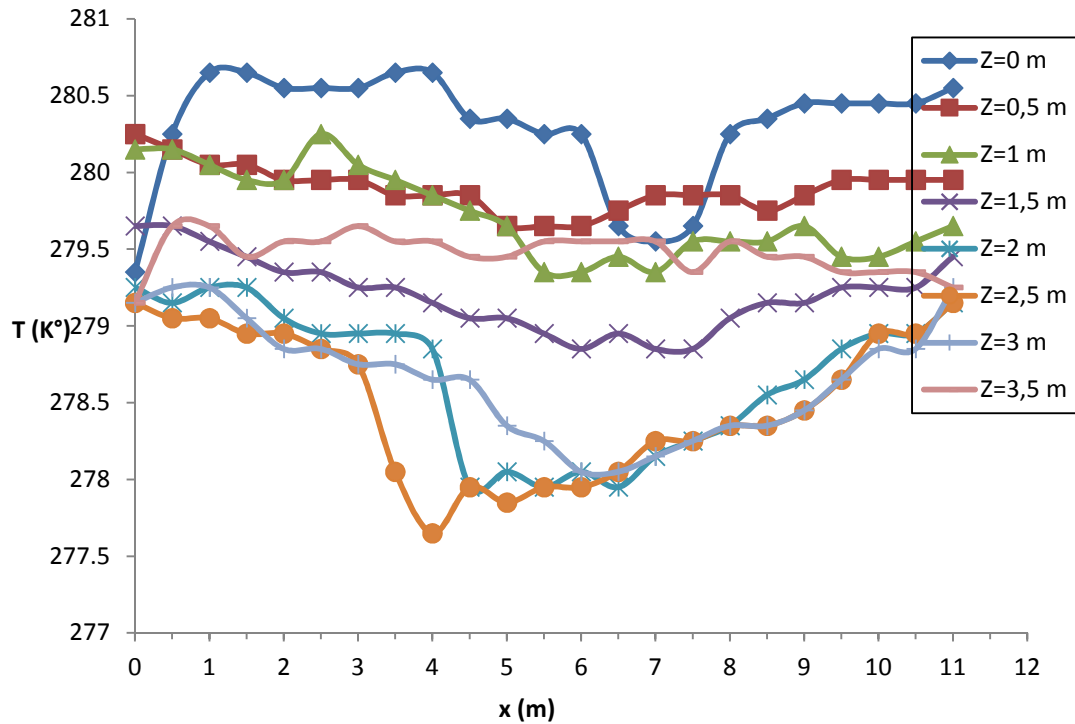


Figure IV.7 : Evolution de la température suivant l'axe ox, plan médiane.

La figure (IV.7) nous donne l'évolution de la température suivant l'axe ox, nous remarquons que dans l'intervalle [0-2m], les températures du toit et du sol sont élevées, pour le même intervalle et pour des hauteurs de [0.5 m à 3 m], nous constatons la chute de la température jusqu'à 277.6 °K à z = 2.5m. De [2m-8m], décroissance de la température tout au long des hauteurs considérées pour la mesure, y compris celles du toit et du sol, de [8m-11m], augmentation des valeurs mesurées de la température. Les températures deviennent constantes en se rapprochant du mur derrière l'évaporateur.

#### IV.4 Analyse des résultats expérimentaux

Cette analyse à comparer l'évolution de la température suivant les trois plans transversaux ( $x = \frac{L}{4}, \frac{2L}{4}, \frac{3L}{4}$ ), à différentes hauteurs du sol jusqu'au toit.

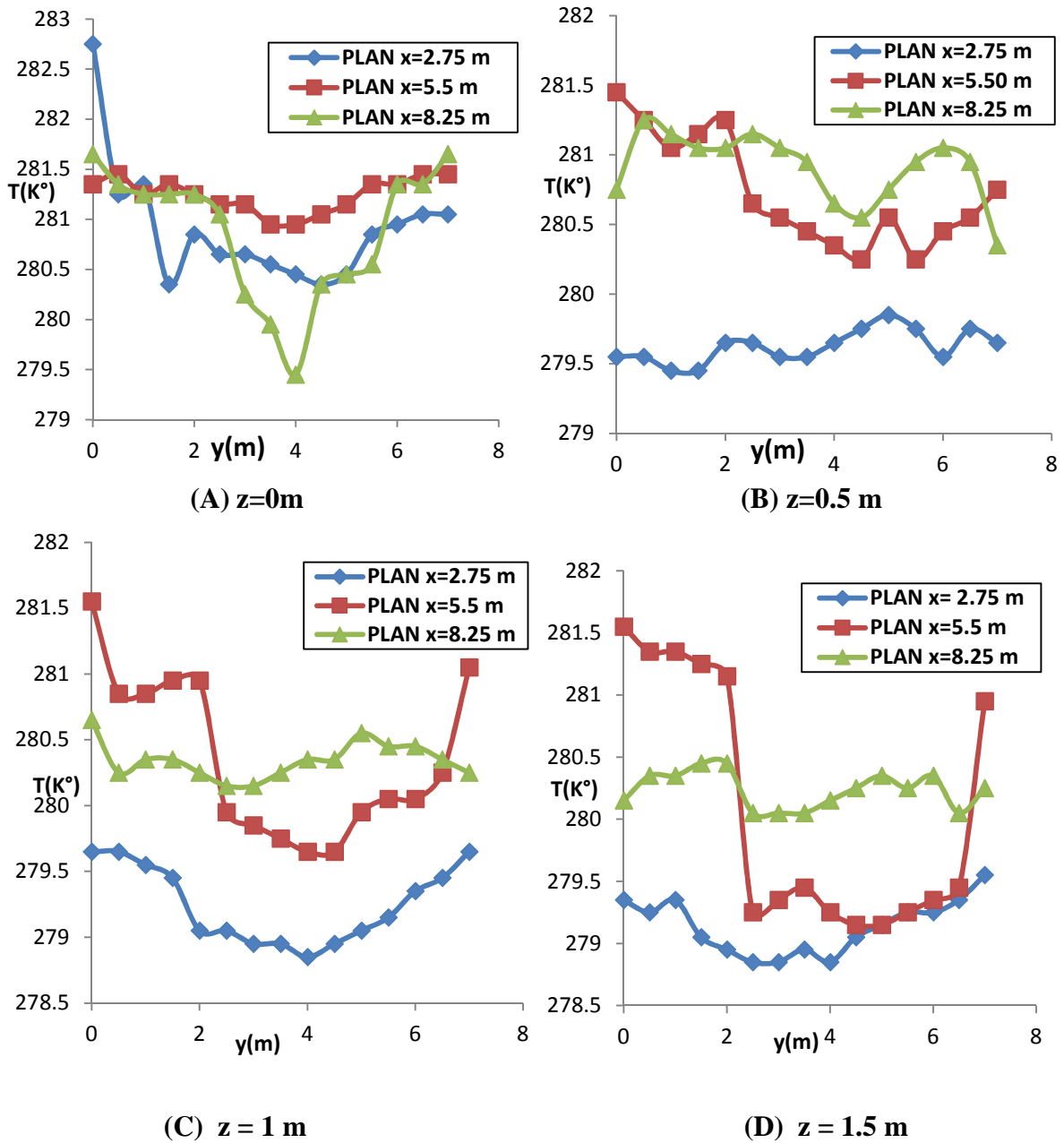
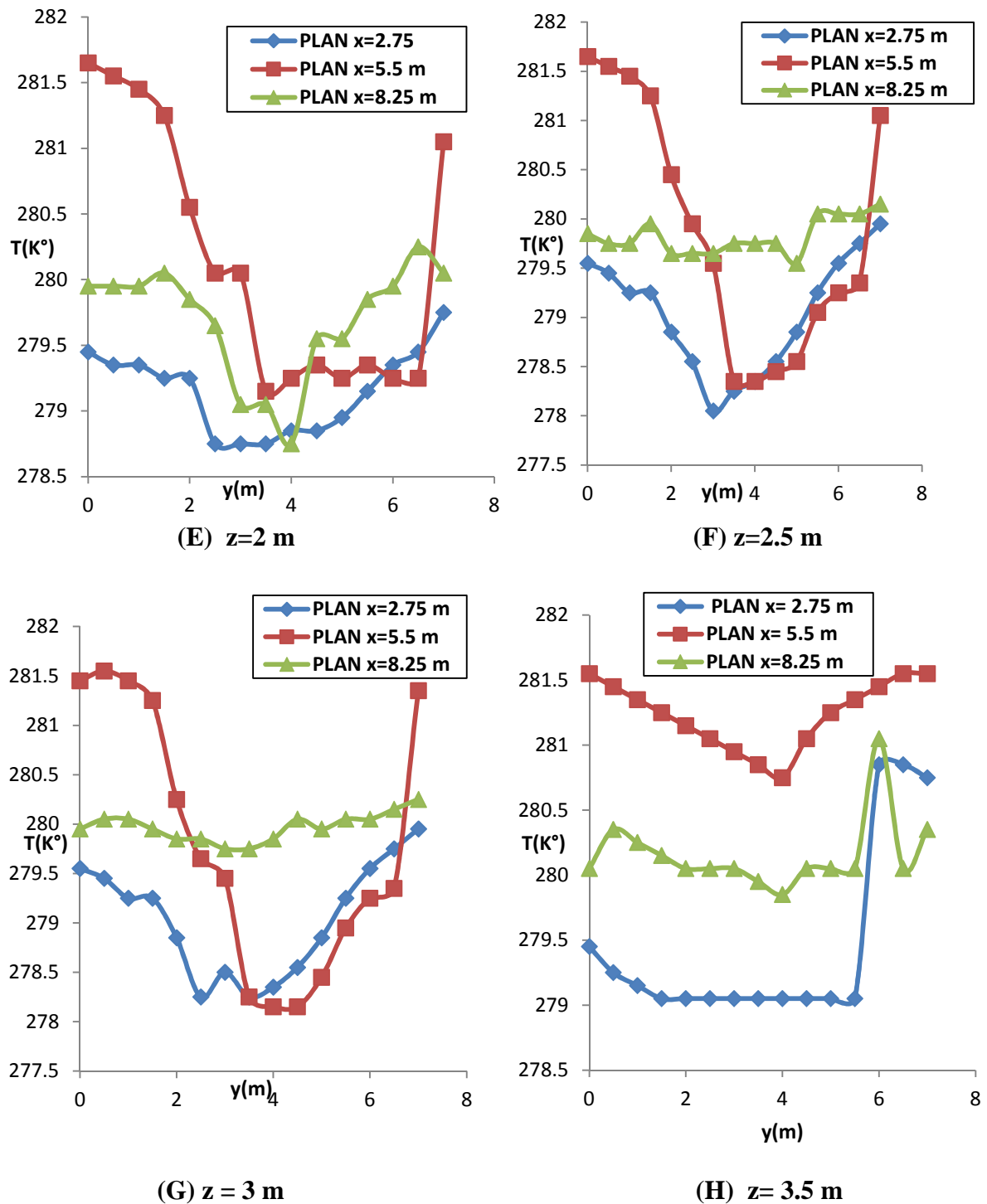


Figure IV.8 : Evolution de la température suivant l'axe oy, (A)  $z=0m$ , (B)  $z=0.5m$ , (C)  $z=1m$ , (D)  $z=1.5m$



**Figure IV.9 :** Evolution de la température suivant l'axe oy, (E)  $z=2\text{m}$ , (F)  $z=2,5\text{m}$ .  
(G)  $z=3\text{m}$ , (H)  $z=3,5\text{m}$ .

Les courbes précédentes représentent la comparaison de l'évolution de la température suivant l'axe oy à des hauteurs variables de  $z=0\text{ m}$  jusqu'à  $z=3.5\text{m}$ , on remarque une croissance de la température selon les plans transversaux, plus on s'éloigne de l'évaporateur la température augmente de ( $1^{\circ}\text{C}$  à  $2^{\circ}\text{C}$ ), on remarque aussi plus on se rapproche de toit la température diminue, et dans l'intervalle  $y=2.5\text{m}$  jusqu'à  $y=5\text{ m}$  on observe une dégradation maximale des températures .

Lorsque ou on se rapproche du mur droit, nous remarquons une liaison entre les températures mesurées en rapport avec les altitudes choisies, jusqu'à ce qu'elles atteignent une température moyenne de  $280.7^{\circ} \text{K}$ .

Nous observons des perturbations de l'allure des températures au niveau du plan  $x= 2/4 L$  entre  $[y= 0\text{m et } y= 2,5\text{m}]$  à cause de la présence des produits dans cette partie, la présence du produit provoque des augmentations de température par la chaleur dégagée par ce dernier.

#### **IV.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons mesuré et étudié la variation des températures à différents plans, longitudinaux et transversaux et nous avons remarqué des dégradations de température à l'intervalle  $y= 2 \text{ m}$  jusqu'à  $y= 4.5 \text{ m}$  et une décroissance de la température tout au long des hauteurs considérées pour la mesure. On observe aussi le cas où on se rapproche des murs nous remarquons confusion entre les températures.

La présence de produits, permet d'augmenter la température à différentes positions.

**Chapitre V**  
**SIMULATION NUMERIQUE**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique obtenus avec le Logiciel(CFD) Fluent. La géométrie de la chambre à été reproduite avec Gambit en 3D, afin d'avoir une idée générale sur La distribution de la température, le champ de pression et la vitesse de l'air dans notre chambre froide.

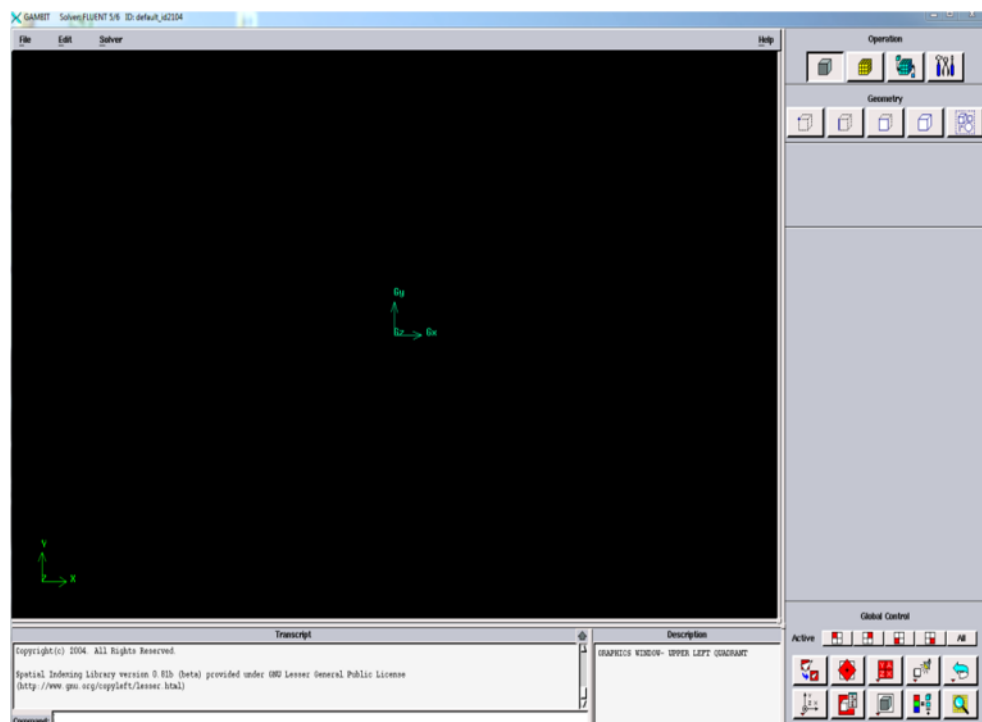
## V.1 Gambit

Gambit est un logiciel de maillage 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie de différentes forme d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics).Il génère des fichiers (.msh\*) pour Fluent. Ce dernier est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. Le Gambit regroupe trois fonctions [13]

- Conception des géométries.
- Maillage des structures.
- Définitions des conditions aux limites.

### V.1.1 Interface principale de gambit

Après le lancement de gambit il nous affiche l'interface principale.



**Figure V.1:** Interface principale.

### V.1.2 Répertoire d'outils d'opérations

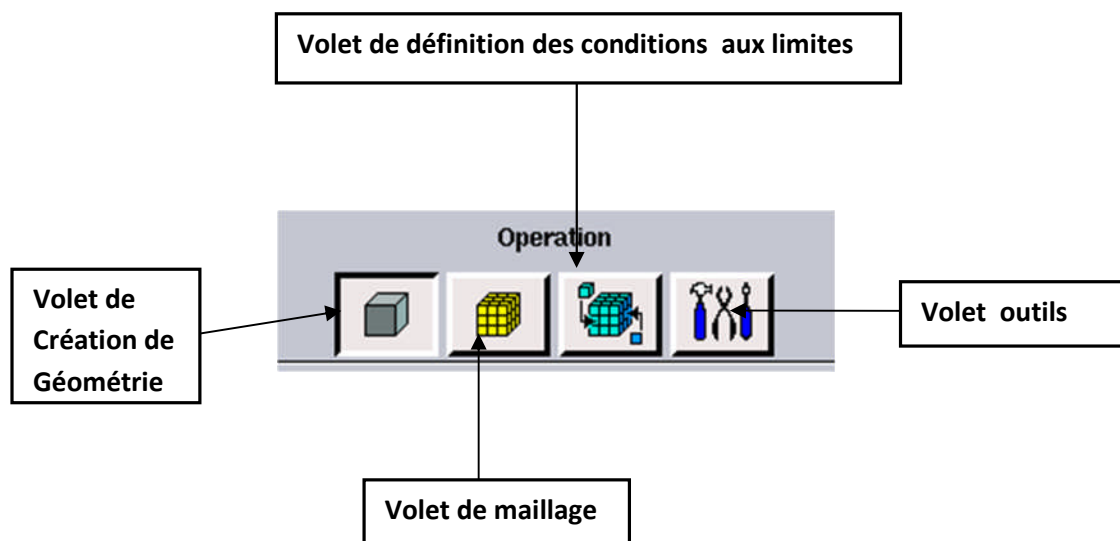


Figure V.2: Répertoire d'outils d'opérations.

### V.1.3 Bouton création de la géométrie

Le premier englobe toutes les opérations de la création de la géométrie, telle la création des points, des lignes des surfaces et des volumes, leur déplacement et leurs rotations selon un axe voulu.....etc.

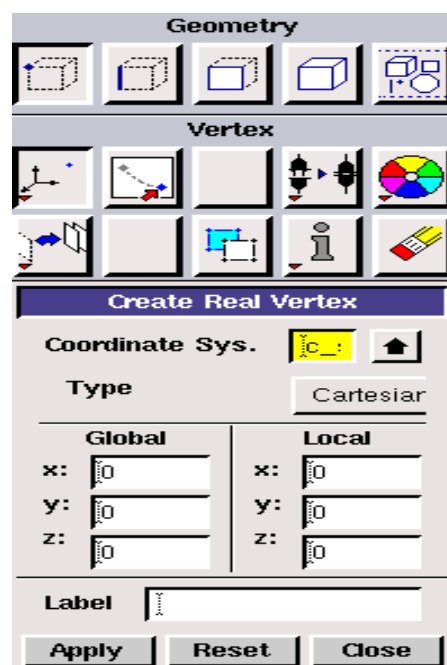


Figure V.3: Menu de création des géométries .

### V.1.4 Bouton de maillage

Le second volet lui est réservé au maillage des structures ,cette opérations nous offre aussi l'option de mailler selon une ligne, une surface ou un volume .

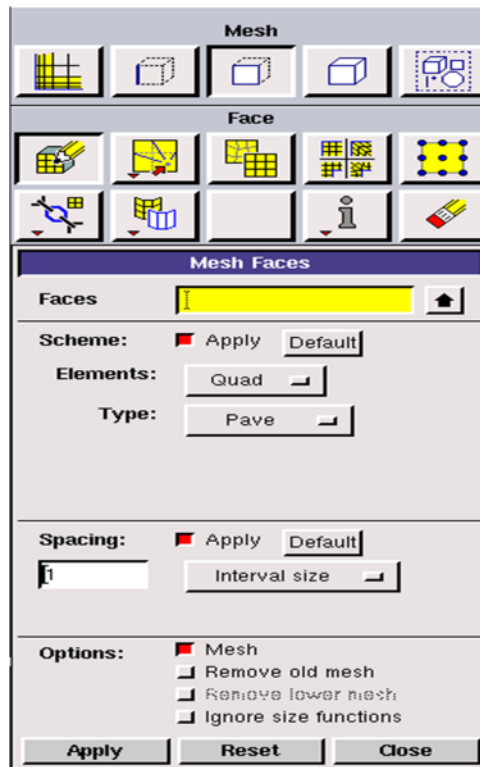


Figure V.4: Menu de maillage .

### V.1.5 Bouton de définitions des conditions aux limites

Le troisième volet, lui comporte la troisième étape qui se réalise sur gambit ,et qui est la définitions des limites.

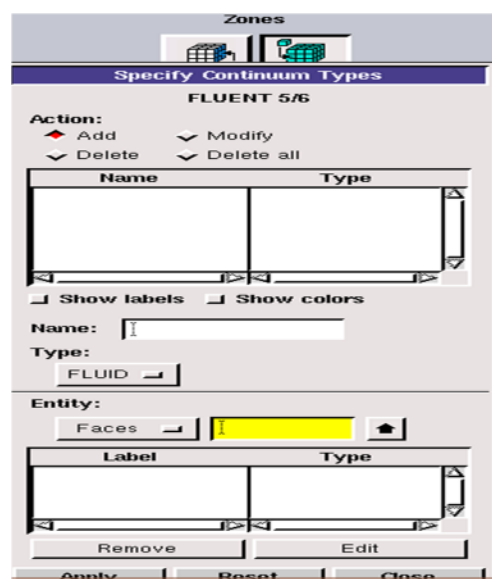


Figure V.5: Menu de définition des conditions aux limites.

### V.1.6 Bouton de contrôle générale

Elle concerne l'affichage, l'orientation, le zoom, la lumière, et la vérification du maillage

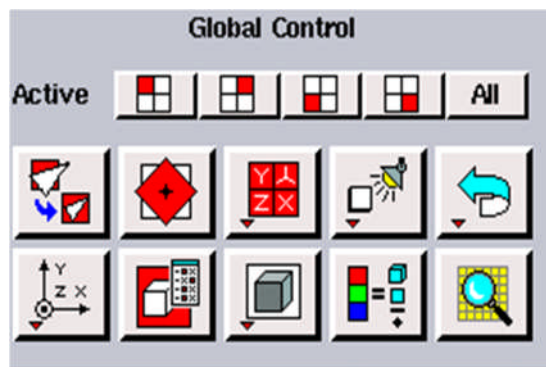


Figure V.6 : Fenêtre de contrôle générale.

## V.2 Code Fluent

C'est un programme informatique destiné à la simulation des écoulements et des transferts de chaleur, c'est un logiciel très fiable, utilisé dans divers domaines, pour la flexibilité de ses résultats, et son adaptation à toutes sortes du maillage. Il permet de raffiner le maillage selon les conditions aux limites, les géométries, les résultats précédemment obtenus, ses qualités nous permettent de bien étudier, les couches limites, couches à cisaillement ... etc. [14]

### V.2.1 Fenêtre de démarrage

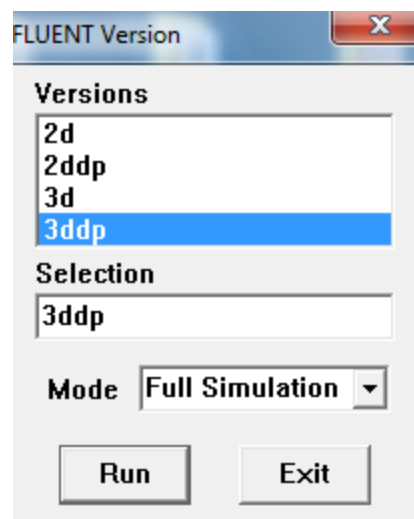
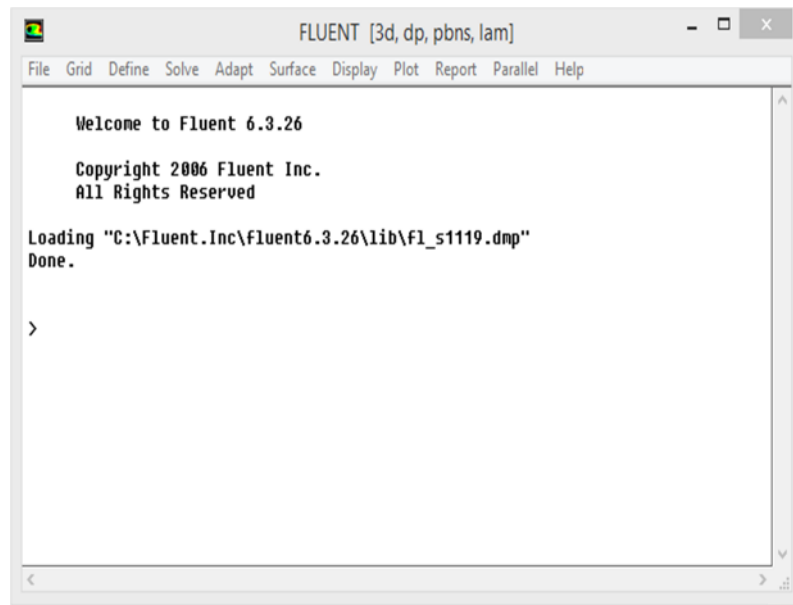


Figure V.7: Fenêtre de démarrage.

- **2d** : Deux dimensions
- **2ddp** : Deux dimensions doubles précisions.
- **3d** : Trois dimensions.
- **3ddp** : Trois dimensions doubles précisions.

## V.2.2 Interface principale



**Figure V.8:** Interface principale.

Pour la procédure numérique on aura besoin des fonctions suivantes

**File :** Comporte les opérations réalisables sur les fichiers : lecture, sauvegarde, importation ...etc.

**Grid :** Pour les opérations de vérification et de manipulation du maillage et de la géométrie.

**Define :** Permet de définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites.

**Solve :** Pour le choix des équations à résoudre, des schémas de discrétisations, les critères de convergence afin d'initialiser le calcul et le démarrer.

**Adapt :** Pour adapter le maillage selon les paramètres voulus.

**Surface :** Pour créer des points, des lignes et des plans nécessaires à l'affichage des résultats.

**Display et plot :** Pour afficher les résultats afin d'être exploités.

**Report :** Permet d'afficher des rapports englobant les détails du phénomène étudié.

**Parallel :** Pour le calcul parallèle.

**Help :** Pour donner des orientations à l'utilisateur, en cas de besoin.

### V.3 Maillage de la géométrie

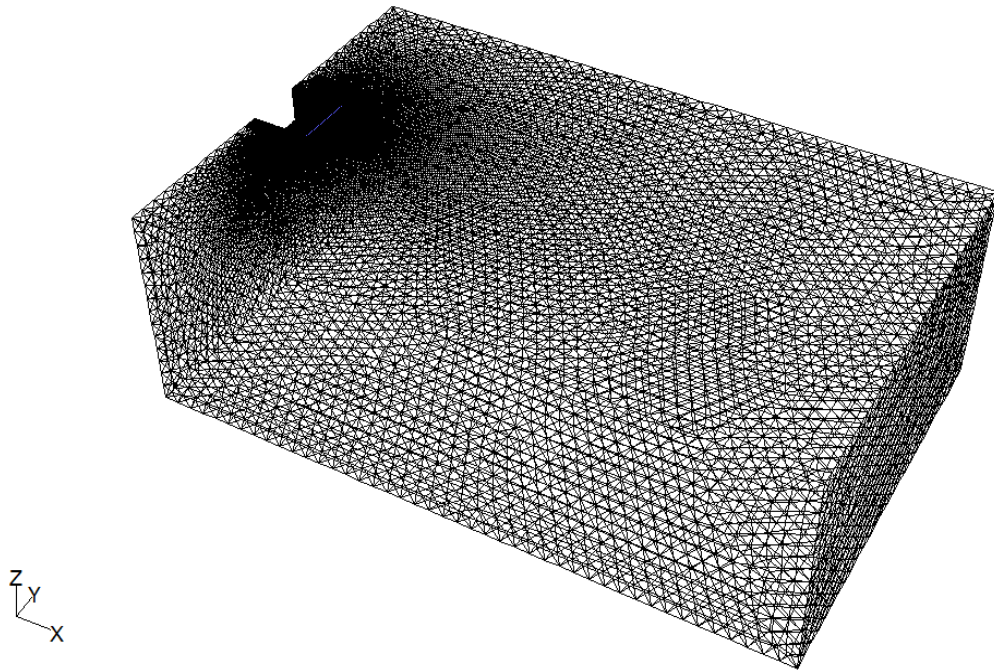


Figure V.9: Maillage de la géométrie.

Le maillage utilisé est triangulaire, non structuré raffiné au voisinage de l'évaporateur générateur de l'air froid.

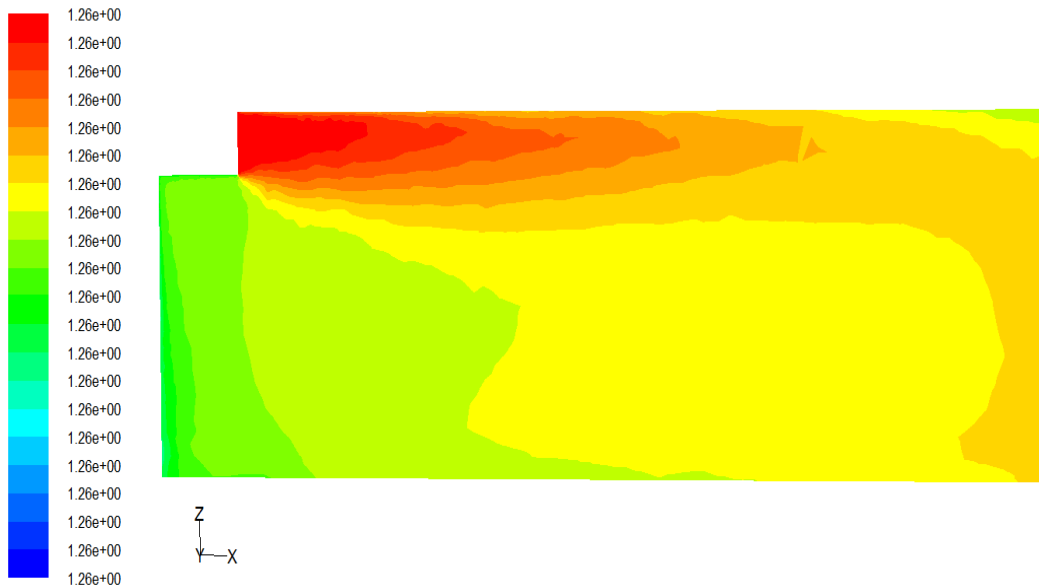
### V.4 Résultats de la simulation numérique pour le plan longitudinal

#### V.4.1 Champ de pression et densité



Figure V.10: Contours de pression.

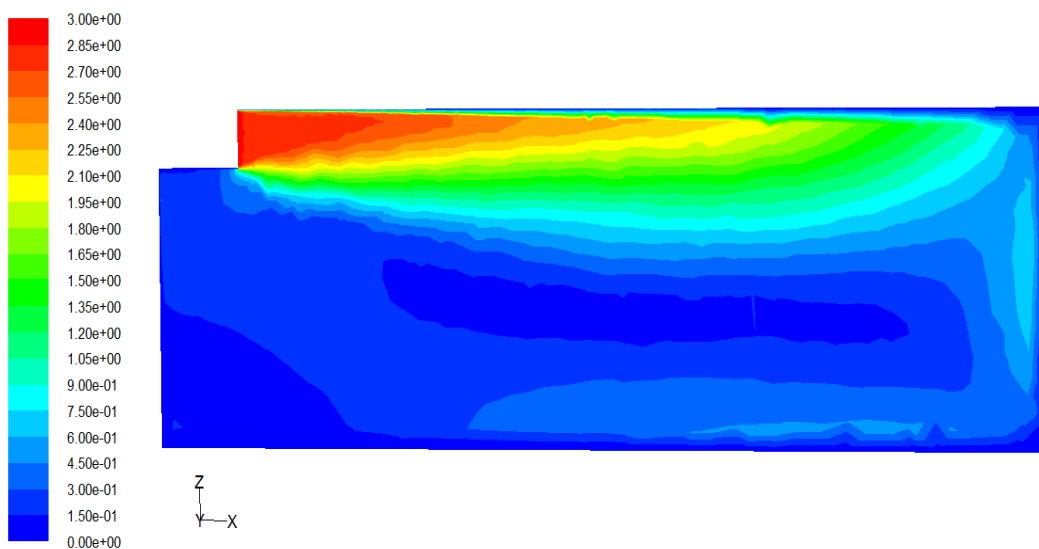
La figure V.10 représente le contour de pression dans la chambre froide, en constate que la répartition de la pression est uniforme, une augmentation légère a la paroi verticale face de l'évaporateur.



**Figure V.11:** Contours de densité.

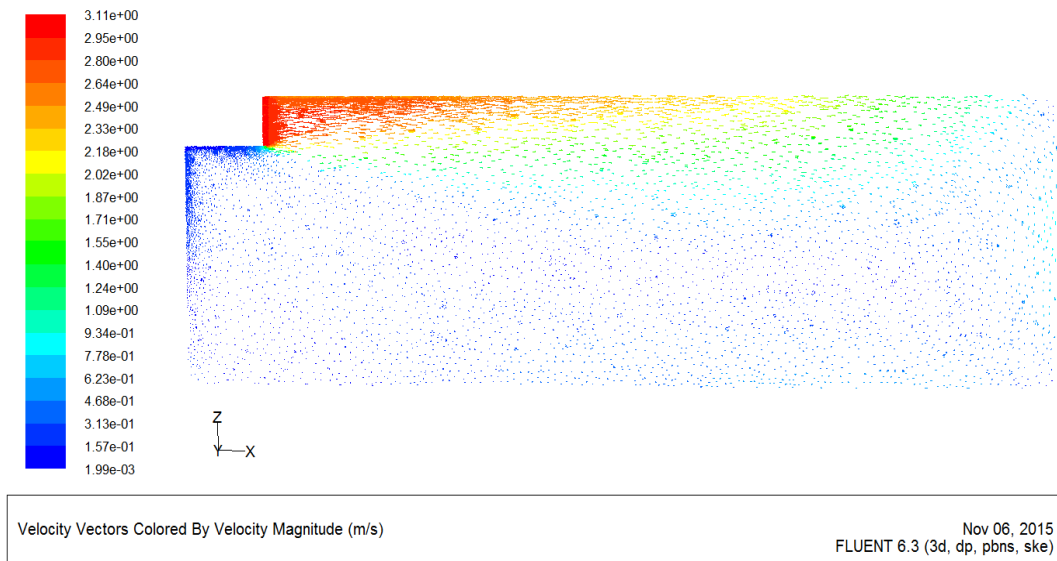
La figure V.11 représente les contours de densité de l'air froid dans la chambre froide, en remarque que ce dernier est maximale près de l'évaporateur et elle se propage le long de la chambre.

#### V.4.2 Champ de vitesse et turbulence



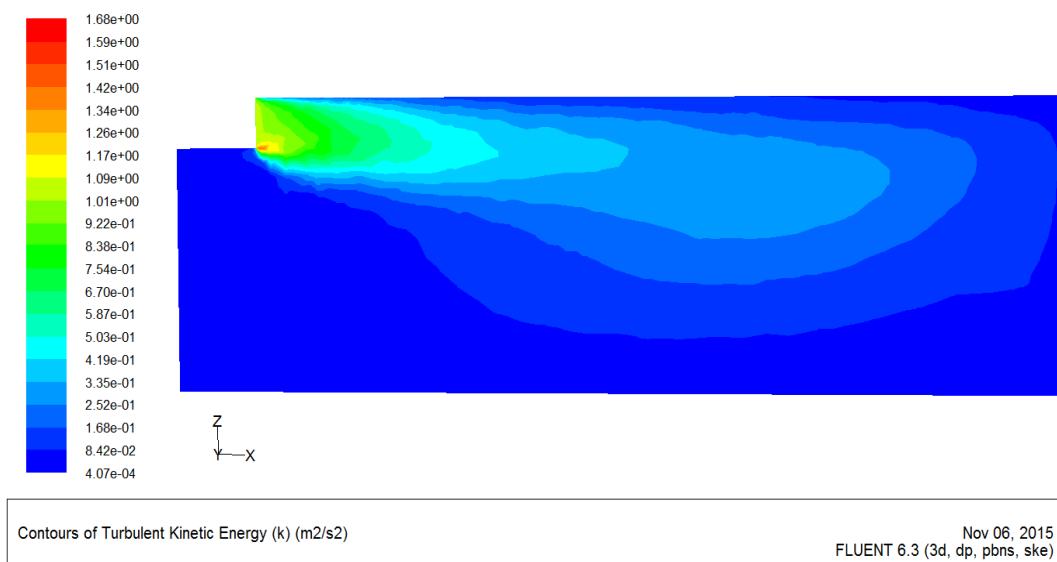
**Figure V.12:** Contours de vitesse.

La figure V.12 représente le contour de vitesse de l'air froid, en remarque que la vitesse est maximale juste à la sortie de l'évaporateur ( $V_0= 3 \text{ m/s}$ ), puis elle se démunie plus qu'on s'éloigne de l'évaporateur.



**Figure V.13:** Vecteurs vitesses.

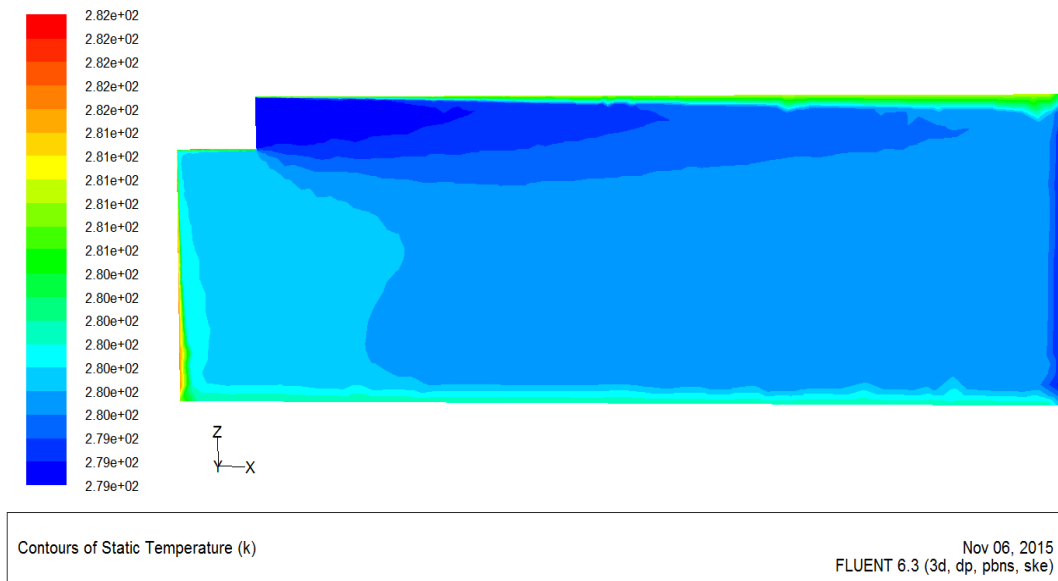
Les contours de vecteurs de vitesse dans cette figure (V.15) montrent la circulation de l'air froid, la vitesse est maximale près de l'évaporateur, puis cette dernière diminue lorsqu'on s'éloigne de l'évaporateur.



**Figure V.14:** Contours de turbulence.

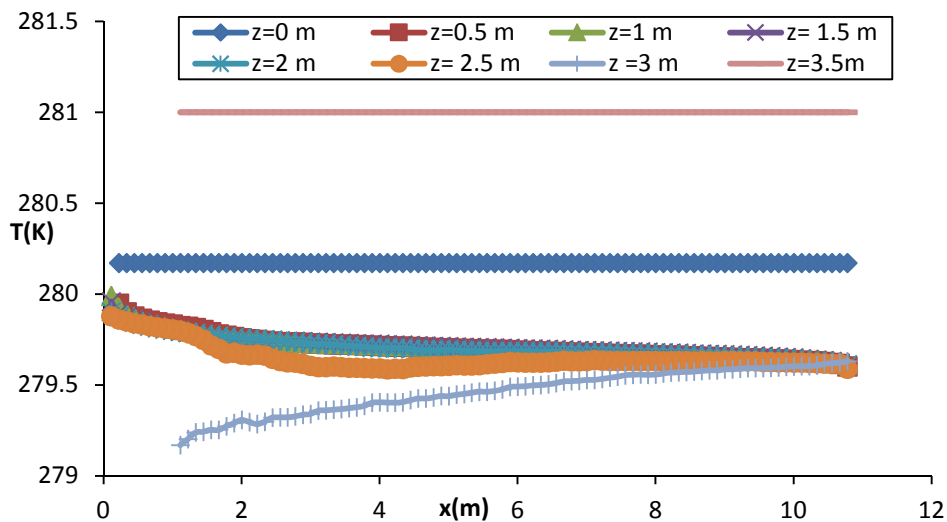
La figure V.14 montre la turbulence créée dans la chambre, on remarque qu'elle est maximale près de l'évaporateur.

### V.4.3 Champ de température



**Figure V.15:** Contours de température (K).

La figure V.13 montre les contours de température, nous remarquons que les températures sont faibles près de l'évaporateur à cause du brassage de l'air, et on a une élévation de température à proximité des parois.



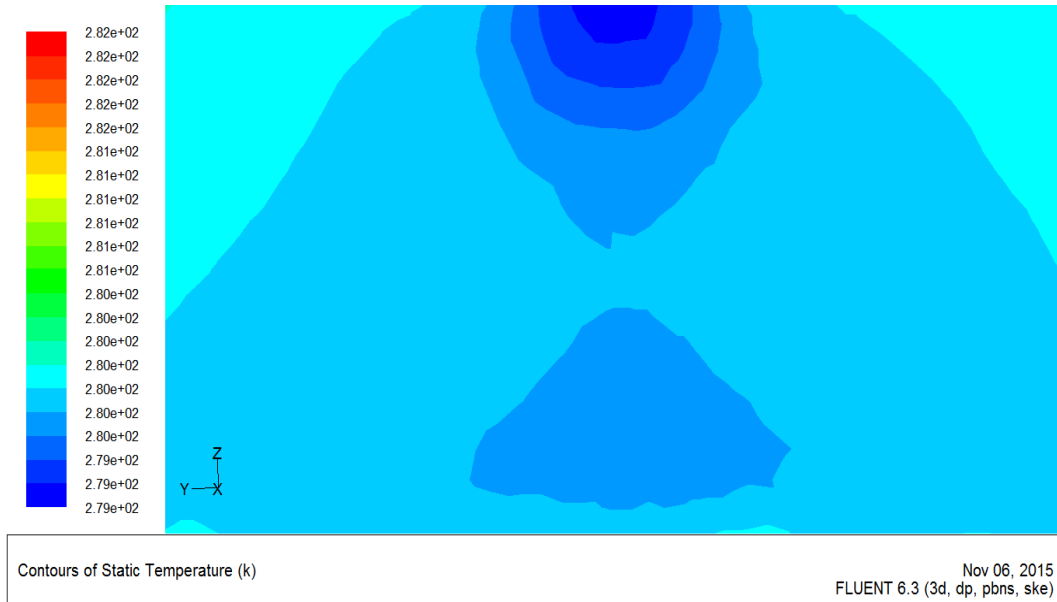
**Figure V.16 :** Evolution des températures numériques (en °K) dans le plan longitudinal.

La figure (V.16) représente l'évolution numérique des températures dans le plan longitudinal, sur le toit et le sol les températures moyennes sont respectivement  $T=281,02$  K et  $T=280$  K, pour les différentes hauteurs  $Z=0,5$  m à  $Z=2,5$  m en remarque une diminution progressive longitudinalement, pour  $Z=3$  m on est de même niveau que l'évaporateur la température est plus faible à la sortie de se dernier puis elle augmente d'une manière

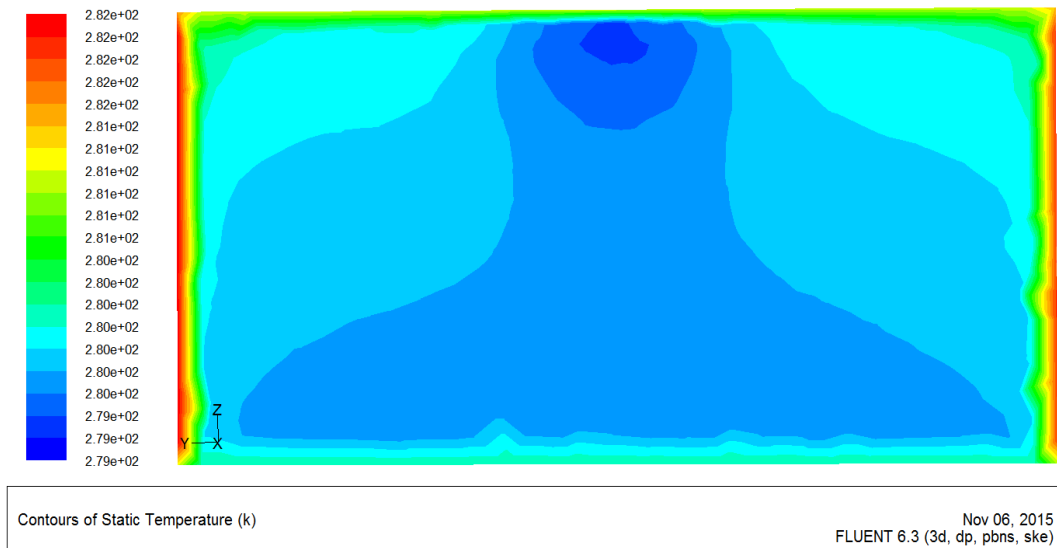
successive longitudinalement pour atteindre la même température que les autres hauteurs précédentes  $T=280,02\text{ K}$ .

## V.5 Résultats de la simulation numérique pour le plan transversal

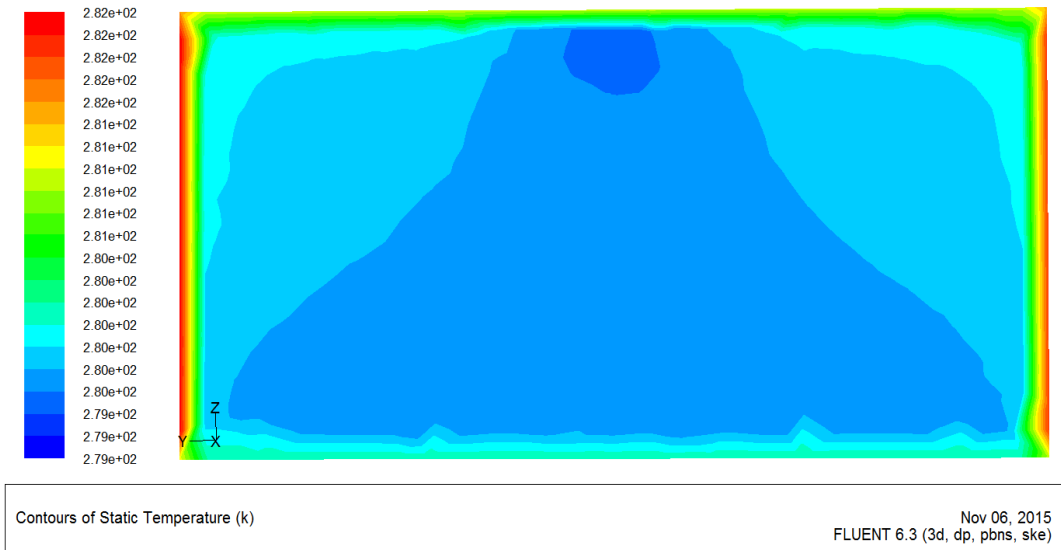
### V.5.1 Champ de température



**Figure V.17:** Contours de température (K) pour le plan transversal  $x=1/4L=2,5\text{m}$ .



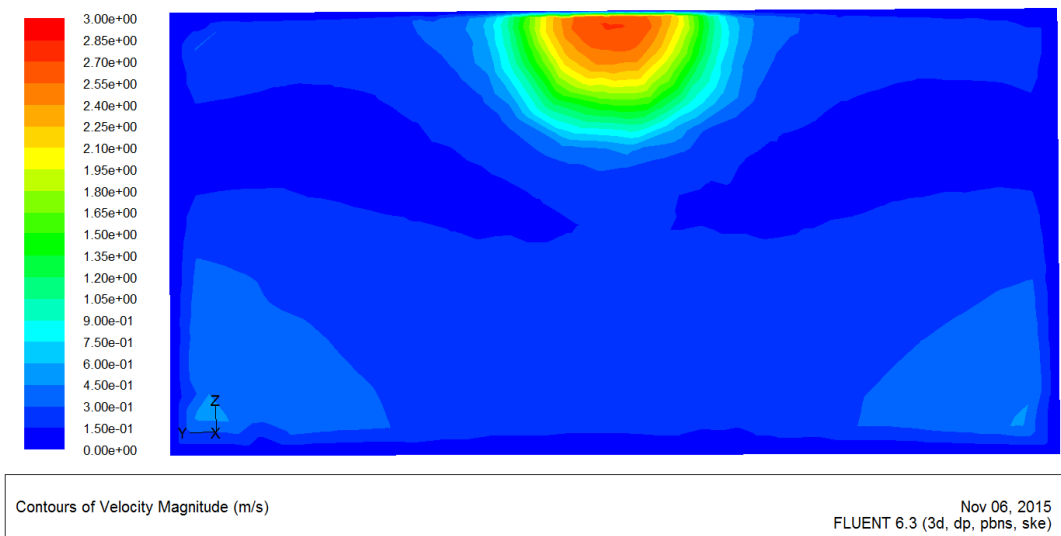
**Figure V.18 :** Contours de température (K) pour le plan transversal  $x=2/4L=3,5\text{m}$ .



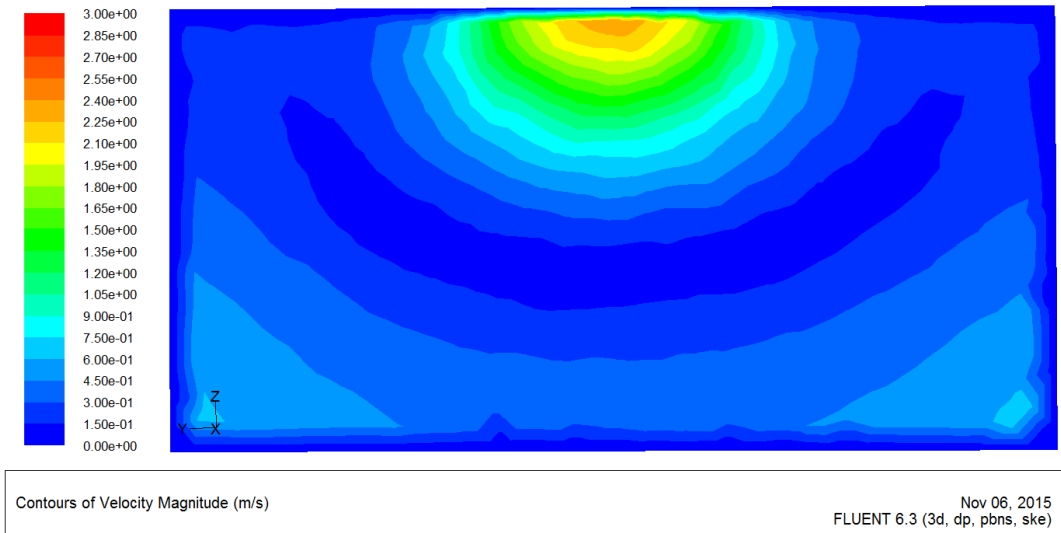
**Figure V.19:** Contours de température (K) pour le plan transversal  $x=3/4L=7m$ .

Les figures (V.17), (V.18) et (V.19) montrent la répartition des températures pour les plans transversaux, une augmentation de température est remarquable au niveau des parois pour les deux plans  $x=2/4L$  et  $x=3/4L$ , on constate que plus qu'on s'éloigne de la zone de soufflage de l'air froid la température augmente au près des parois.

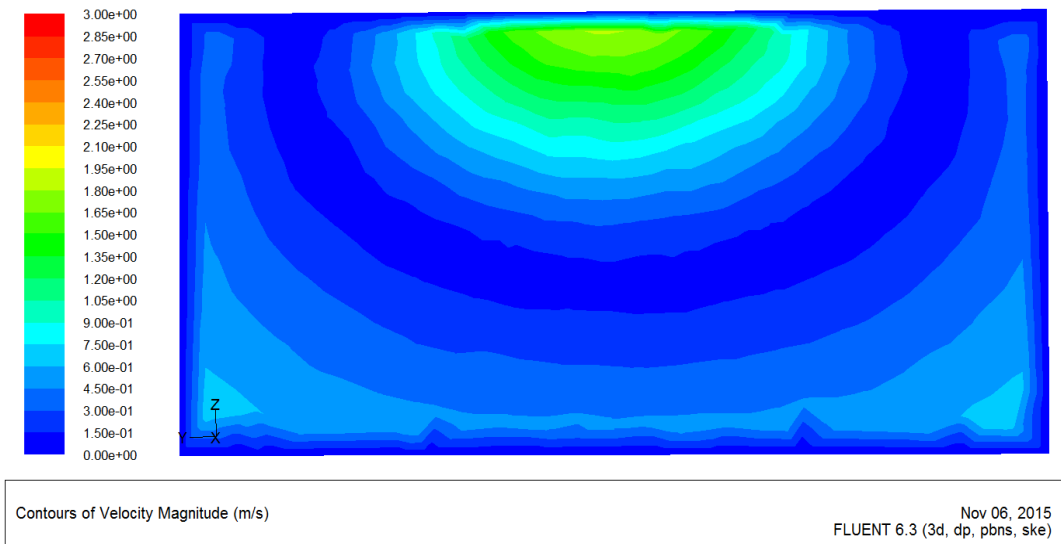
### V.5.2 Champ de vitesse pour $V_0=3\text{ m/s}$



**Figure V.20 :** Contours de vitesse pour le plan  $x=1/4L= 2,5m$ .

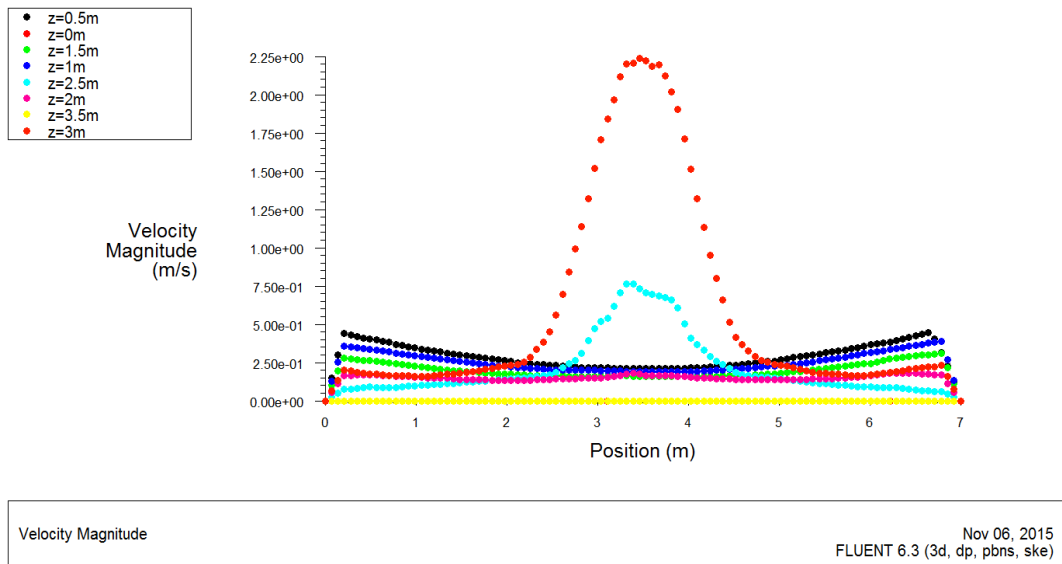


**Figure V.21:** Contours de vitesse pour le plan  $x=2/4L=3,5m$ .



**Figure V. 22:** Contours de vitesse pour le plan  $x=3/4L=7m$ .

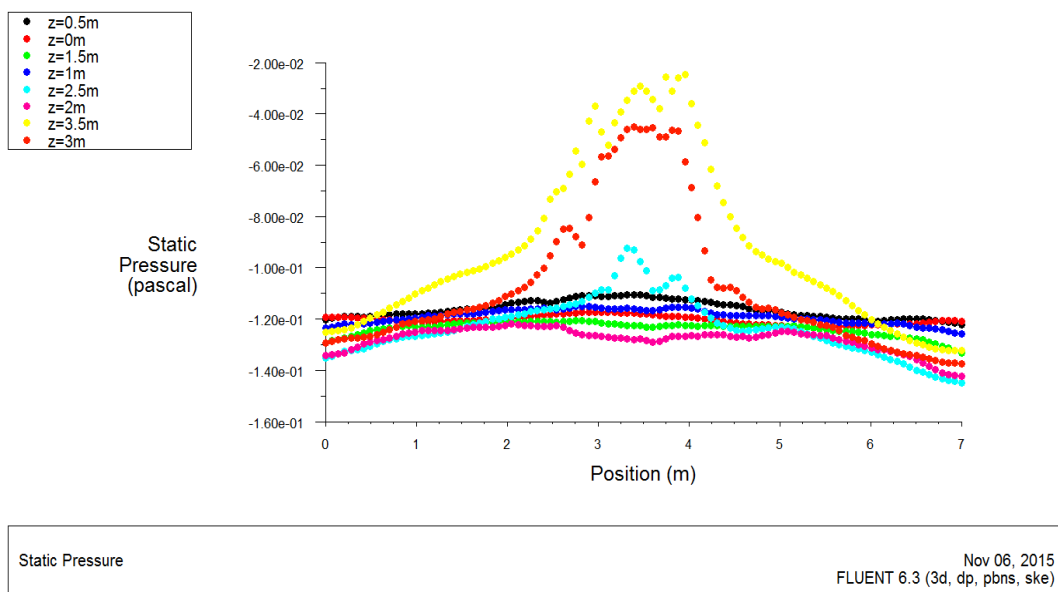
Les figures (V.20), (V.21) et (V.22) montrent le champ de vitesse pour les plans transversaux, on remarque une dilatation de la zone du jet de l'air froid, la vitesse du jet est maximale à la sortie de l'évaporateur  $V_0=3m/s$ , puis elle diminue lorsqu'on se déplace du plan à un autre.



**Figure V.23:** Profile de vitesse pour le plan  $x=1/4L=2,5m$ .

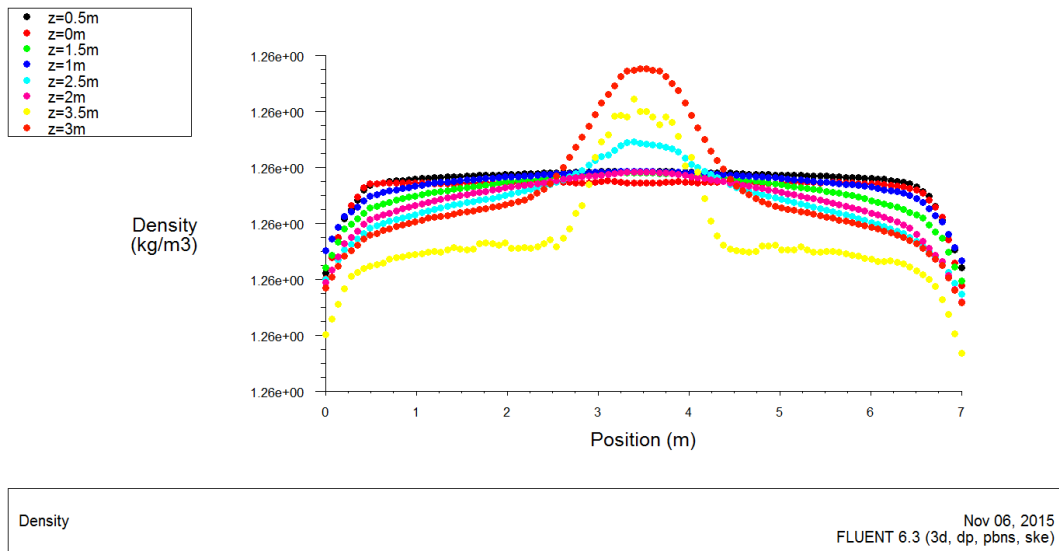
La figure V.23 nous présente le profile de vitesse au plan  $x=1/4L$ , on observe qu'elle est uniforme le long de  $y$  pour des hauteurs  $z=0m$  à  $z=2m$ , et elle est maximale juste à la sortie de l'évaporateur à  $Z=3m$ .

### V.5.3 Profile de pression, de densité et de turbulence



**Figure V.24:** Profile de pression pour le plan  $x=1/4L= 2,5m$ .

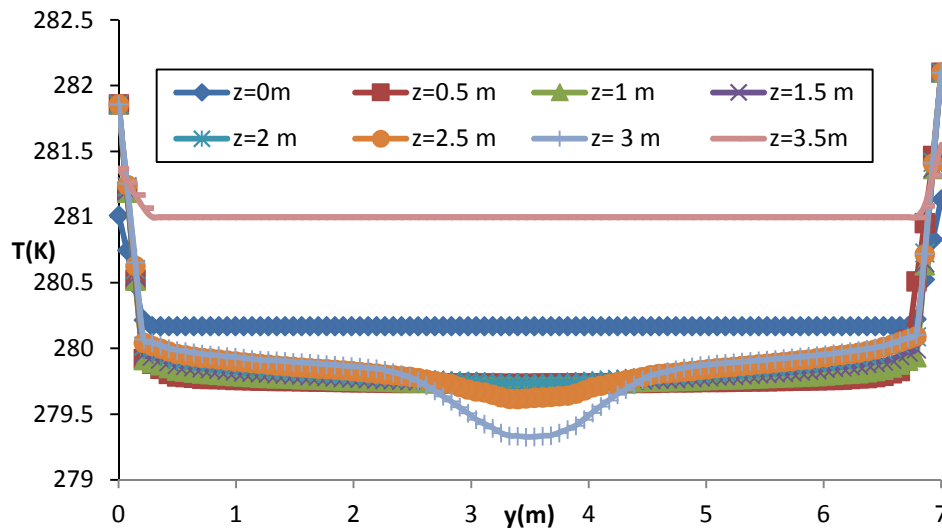
Dans cette figure (V.24), nous avons le profile de pression, cette dernière est constante si on se déplace du mur gauche vers le mur droit pour les hauteurs  $Z=0m$  jusqu'à  $Z=2m$ , a partir de  $Z=2,5m$  pour  $y= 2m$  à  $y=5m$  la pression augmente jusqu'à son maximum à  $Z= 3,5m$  pour  $y=3,5m$ .



**Figure V.25:** Profile de densité pour le plan  $x=1/4L= 2,5m$ .

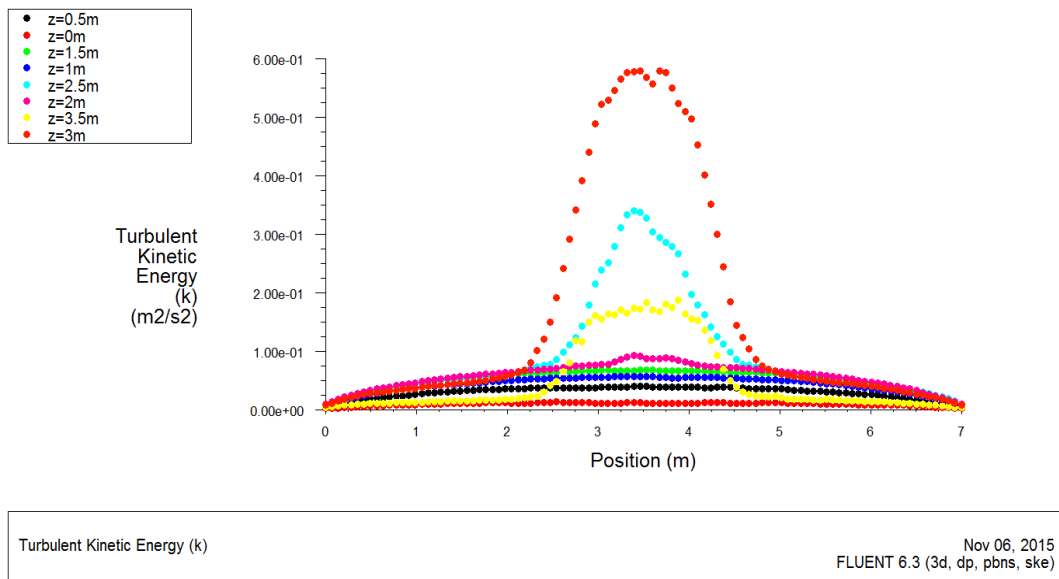
Dans la figure (V.25) nous avons le profile de densité pour le plan  $x=1/4L$ , on constate qu'elle est uniforme le long du plan, elle atteint son maximum dans l'intervalle  $[y= 3m \text{ à } y=4m]$  pour les hauteurs  $(z=2,5 m \text{ à } z=3,5m)$  près de l'évaporateur.

### V.5.4 Profile de température et turbulence



**Figure V.26:** Profile de température numérique (K) pour le plan  $x=1/4L= 2,5m$ .

La figure (V.26) nous montre le profile de température du plan transversal obtenu numériquement, on remarque des températures élevées sur le toit et le sol (températures moyennes), quand  $Z$  variait de  $0,5 m$  à  $3m$  les températures fluctuent légèrement, on remarque aussi à  $Z=3m$  et  $(y=3m \text{ à } y=4m)$  une chute sensible de la température très proche de l'évaporateur.

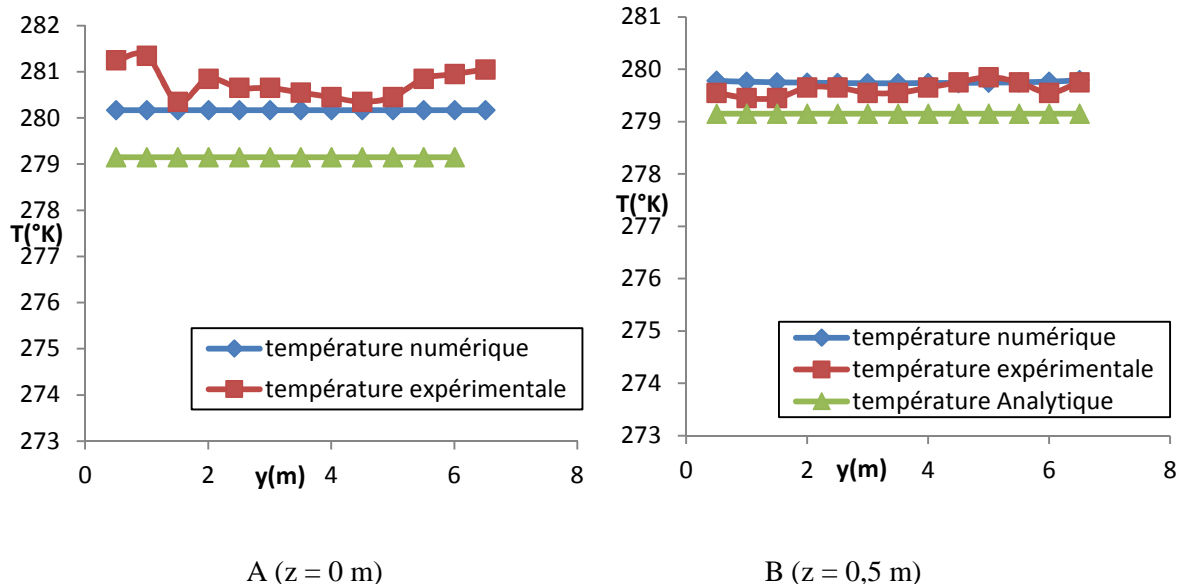


**Figure V.27:** Profile de turbulence pour le plan  $x=1/4L=2,5m$ .

La figure (V.27) représente le profile de turbulence pour le plan  $x= 1/4L$ , on remarque que cette dernière varie dans l'intervalle ( $y=2m$  à  $y=5m$ ) pour les hauteurs  $z=2,5m$  jusqu'à  $z=3,5m$  très proche de l'évaporateur ou la vitesse du jet est maximale.

## V.6 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

### V.6.1 Plan transversal ( $x=1/4L$ )



**Figure V.28:** Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 0m$  et  $z=0,5 m$ )

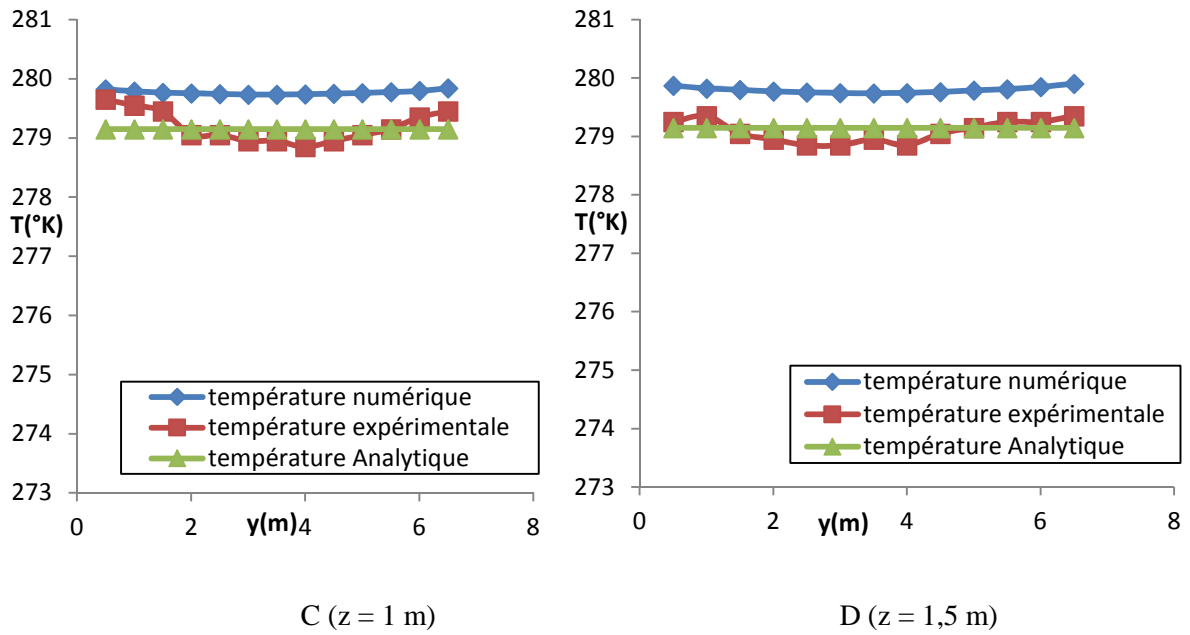


Figure V.29: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à (z= 1m et z=1,5 m)

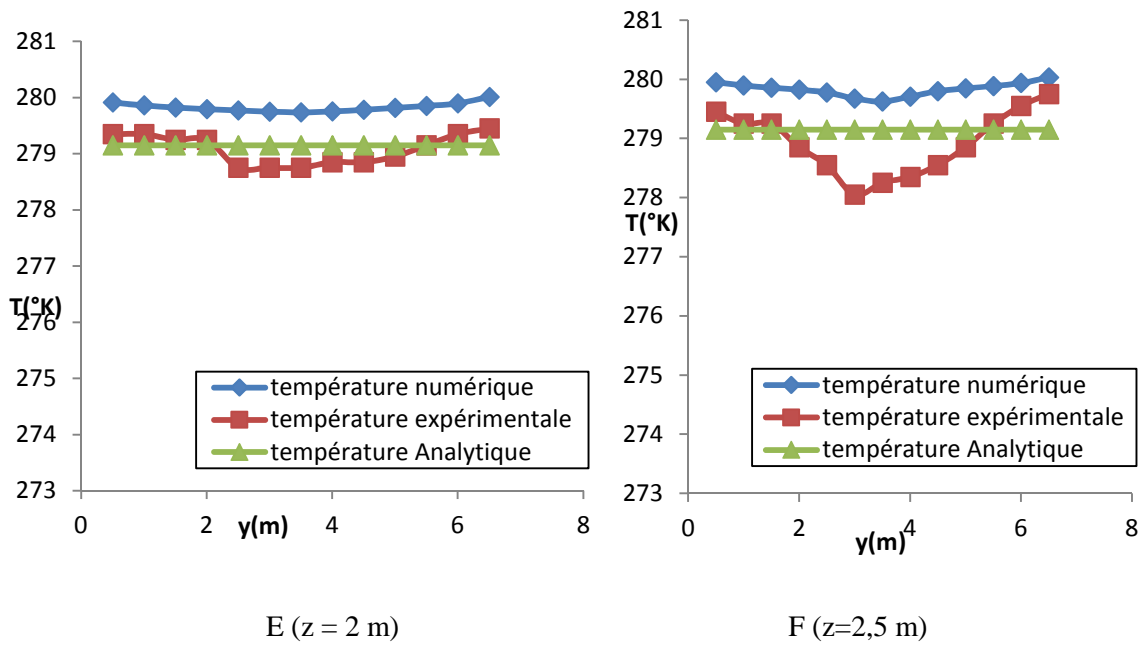


Figure V.30: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à (z= 2m et z=2,5 m)

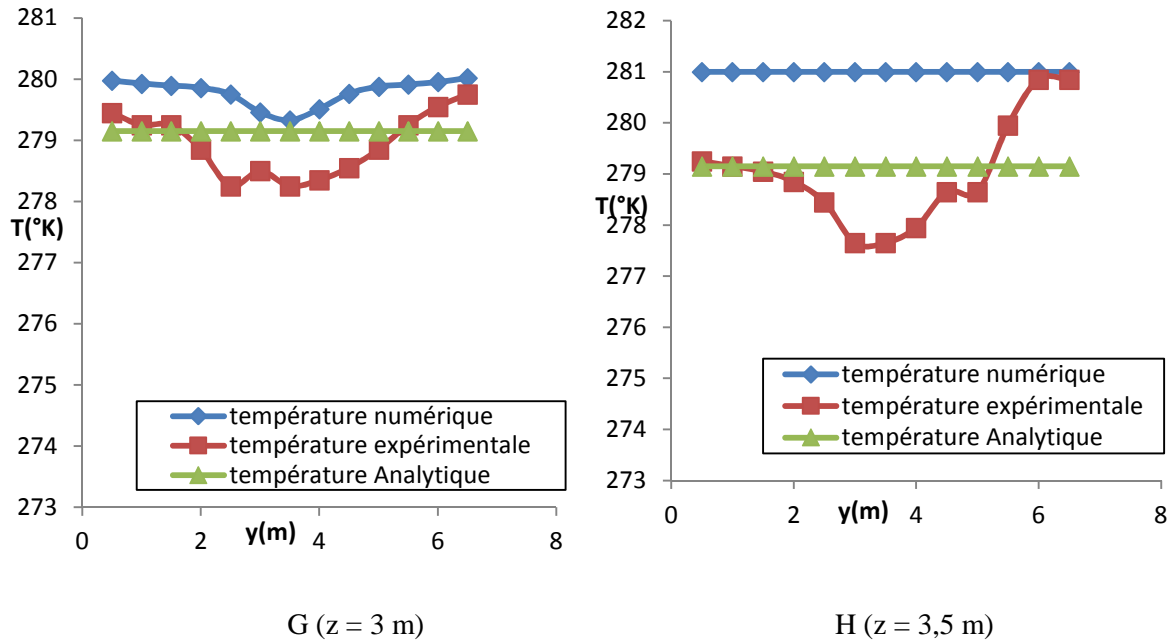


Figure V.31: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 3\text{ m}$  et  $z=3,5\text{ m}$ )

Les courbes précédentes montre une comparaison de l'évolution de la température dans le plan transversal ( $x=1/4L$ ) numérique et expérimentale suivant l'axe oy à des hauteurs variées entre  $z=0\text{ m}$  jusqu'à  $z= 3.5\text{ m}$ , on constate que les résultats expérimentaux sont très proche aux résultats de la simulation numérique effectuée.

V.6.2 Plan longitudinal

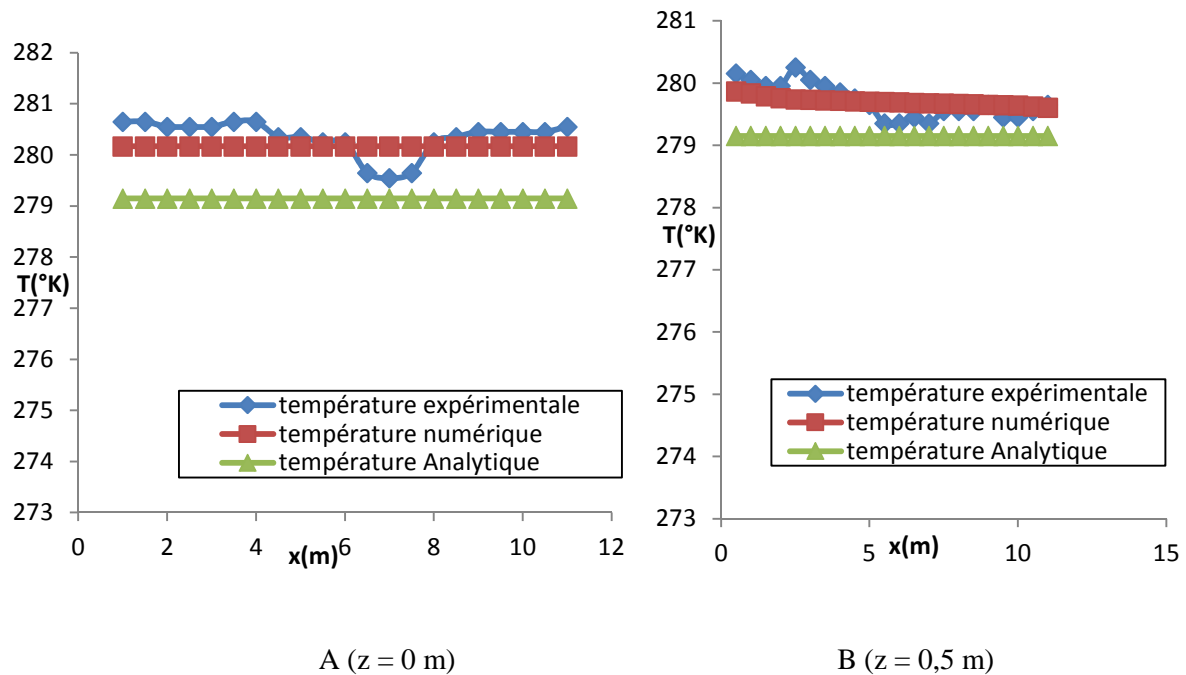


Figure V.32: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 0\text{ m}$  et  $z=0,5\text{ m}$ )

Plan longitudinal

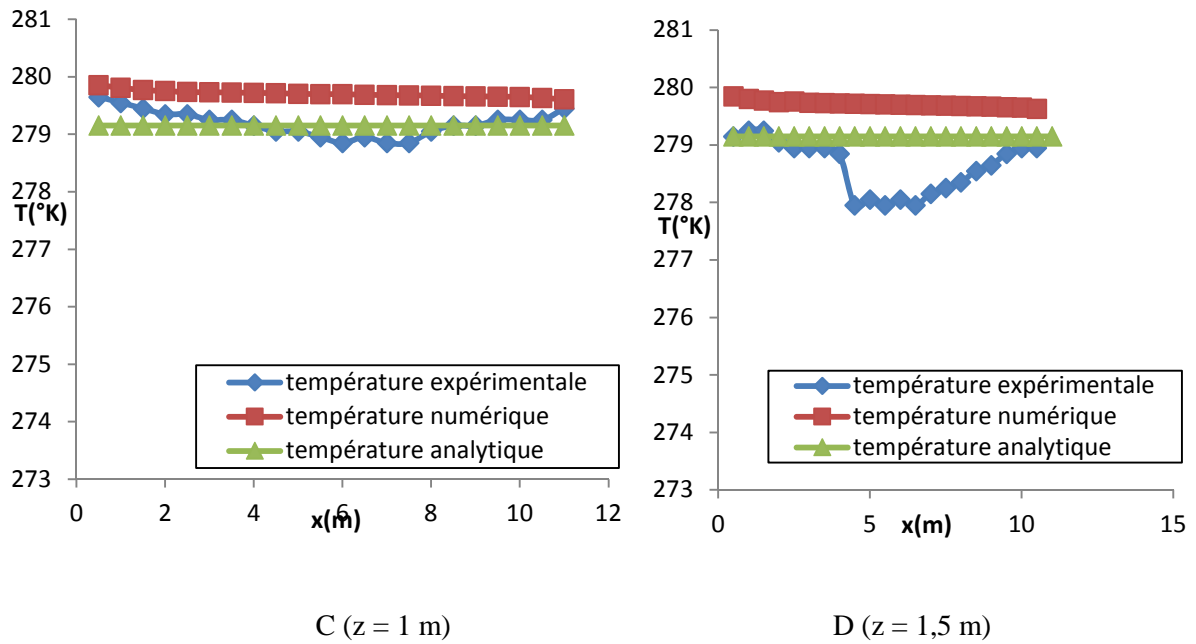


Figure V.33: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 1\text{m}$  et  $z=1,5 \text{ m}$ )

Plan longitudinal

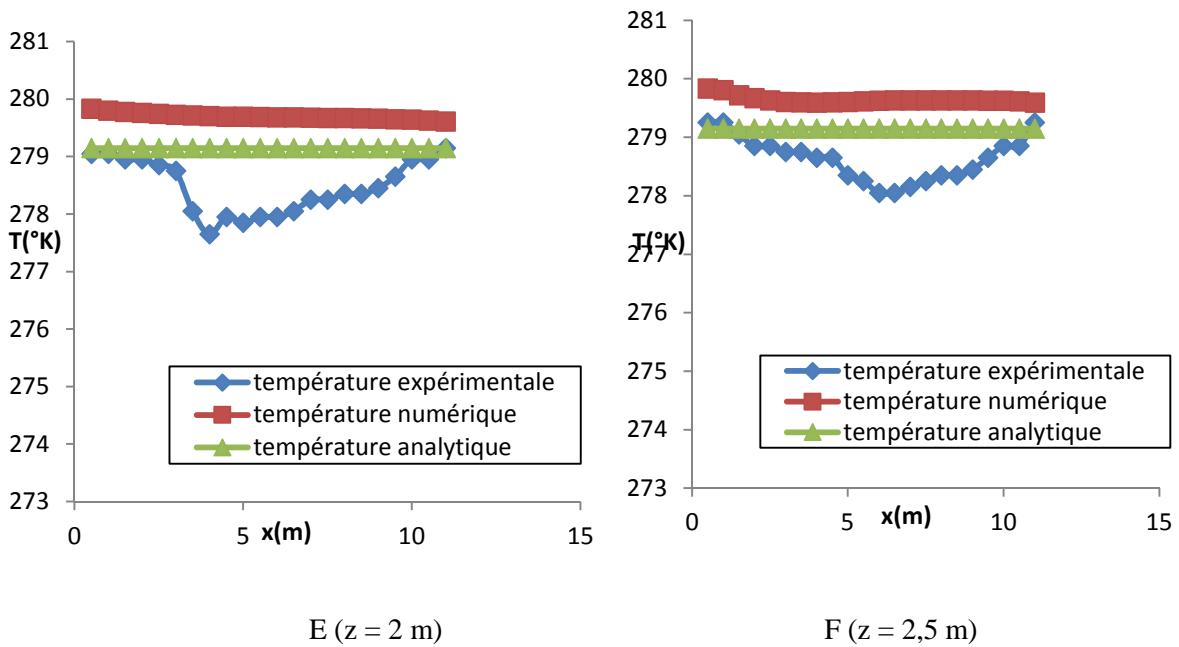
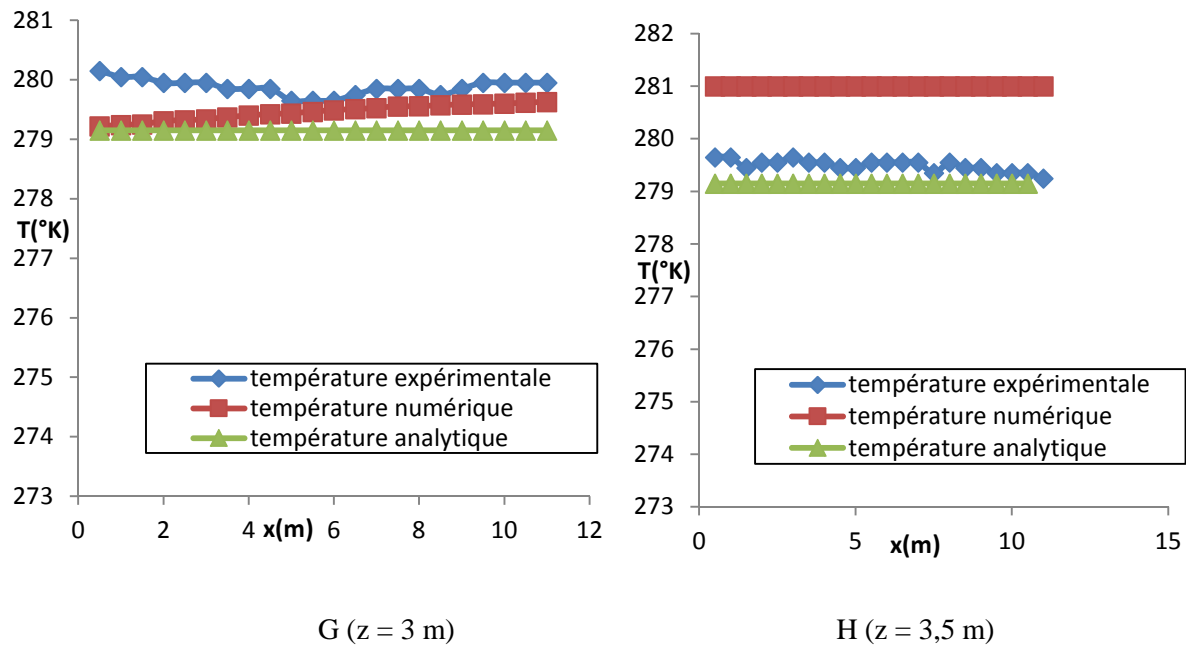


Figure V.34: Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 2\text{m}$  et  $z=2,5 \text{ m}$ )

Plan longitudinal



**Figure V.35:** Courbes comparatives de température numérique et expérimentale à ( $z= 3\text{ m}$  et  $z=3,5\text{ m}$ )

Plan longitudinal

Les courbes précédentes montre une comparaison de l'évolution de la température dans le plan longitudinal numérique et expérimentale suivant l'axe  $ox$  à des hauteurs varient entre  $z=0\text{ m}$  jusqu'à  $z= 3.5\text{m}$ , on constate que les résultats expérimentaux se confondent aux résultats de la simulation numérique effectuée ces deux derniers sont proches de la température analytique  $T = 279\text{ K}$ .

## V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une simulation numérique à l'aide d'un logiciel CFD, et on a obtenus l'évolution numérique de la température et le champ de vitesse de l'air froid dans la chambre froide pour les mêmes conditions que celles des mesures l'expérimentales, puis nous avons essayé de comparer nos résultats expérimentaux avec celles de la simulation numériques, on constate que les résultats sont assez satisfaisantes vue qu'ils sont très proche et les courbes comparatives de se chapitre montre parfaitement cela.

## Conclusion Générale

La recherche bibliographique et les différentes généralités du chapitre premier nous ont permis de découvrir et comprendre le monde de la conservation de denrées alimentaires par réfrigération. Par la suite, on s'est intéressé à la mise en exergue de l'ensemble des charges thermiques susceptibles d'être prises en compte dans le bilan thermique d'une chambre froide. Durant la phase de conception, des hypothèses simplificatrices sont toujours nécessaires pour simplifier les calculs.

Les équations régissant l'écoulement de l'air à l'intérieur de la chambre froide en coordonnées cartésiennes, les mesures expérimentales effectuées et la simulation numérique nous ont permis de découvrir et suivre l'évolution de la température dans l'enceinte froide avec un air froid provenant d'un évaporateur situé en dessous du toit de la chambre bien combiné avec une stratification de couches thermiques classique.

Les résultats analytiques, expérimentaux et numériques nous permettent de déduire un mouvement de particules complexe suivant les deux sens longitudinal et transversal. Dans quelques endroits particuliers de la chambre froide, traduits par des positions  $(x,y,z)$  la température peut augmenter jusqu'à 3 °C relativement à celle de l'air froid issu initialement de l'évaporateur. La répartition de la température expérimentale est très apparente lorsque on s'éloigne de l'évaporateur source de l'air froid elle est aussi affectée par la présence des produits entreposés.

On constate qu'on a un bon accord entre les résultats numériques, analytiques et les mesures expérimentales de la température, par conséquent la simulation numérique nous donne une idée générale sur l'évolution des autres paramètres qu'on n'a pas pu mesurer comme la pression et la vitesse de l'air à l'intérieur de la chambre. Ce travail nous a permis de découvrir le monde des chambres froides et d'effectuer des mesures réelles sur le terrain.

Le stage effectué à la société SNC METNA nous a été plus que bénéfique et nous a permis de constater de plus près les performances des chambres froides modernes qui ont des murs industriels en sandwich fabriqués à base de mousses de Polyuréthane.

## Références Bibliographiques

- [1] WWW.KIDE.COM
- [2] OTMAN JABLER, Chambre froide, juillet 2013
- [3] <https://www.energypedia.fr>. chambre tuniso- allemande de l'industrie et de commerce, article sur froid commercial et chambre froide,
- [4] <https://www.abcclim.net/> technique de conservation
- [5] W. MAAKE- H.-J. ECKERT, Manuel technique du froid, Jean-Louis CAUCHEPIN, PYC . Édition 1993, Le Pohlman.
- [6] S. BOUCHAKHCHOUKHA, Etude d'un Système de Réfrigération de Grande Capacité 2014-2015.
- [7] H-J.Breidert, Calcul des chambres froides (traduction de jean –louis cauchepin), 1998
- [8] Cours général-le froid- « Technique Du Froid, cours de base, juillet 2007.
- [9] <https://www.abcclim.net/> Bilan –Thermique Chambre Froide (1).
- [10] J.F.SACADURA, Initiation aux Transferts Thermiques, Techniques et documentations, 1980.
- [11] WWW.humidiclim;com , fiche technique thermomètre infrarouge,
- [12] SEBASTIENE CANDAEEL, Livre Mécanique des fluides cours, 2<sup>e</sup> Edition, juin 2001
- [13] GAMBIT 2.0 Documentation. User's Guide. Modeling Guide. Tutorial Guide.
- [14] FLUENT 6.0 Documentation. User's Guide. Modeling Guide. Tutorial Guide.
- [15] <https://www.yonis-shop.com> > thermometre infrarouge laser électronique sans contact max 550 °C
- [16] <https://www.testoon.com> > multimetrix.

Annexe 1 :

**Tableau 1.1 : Coefficient de transmission thermique K d'une paroi sandwich composée d'une âme en mousse rigide de polyuréthane et deux revêtements métalliques.**

Épaisseur d'isolant mm	Coefficient K W/m <sup>2</sup> K	Ecart de température conseillé K	Utilisation jusqu'à environ °C
50	0.39	20	-4
75	0.26	34	-10
100	0.19	45	-20
125	0.15	56	-30
150	0.13	70	-45

**Tableau 1.2 : Résistances thermique superficielles 1/h<sub>e</sub> en [m<sup>2</sup> K.W] des parois d'une chambre froide.**

Coté externe de la paroi	1/h <sub>e</sub>	Coté interne de la paroi	1/h <sub>i</sub>
Cas ou il est en contact avec l'air extérieur	0.03	Cas d'une chambre froide en ventilation mécanique	0.06
Cas ou il est en contact avec un autre local	0.12	Cas d'une chambre froide en ventilation naturelle	0.12

**Tableau 1.3 : Calcul de la résistance thermique des différentes couches de matériaux constituant le sol de la resserre.**

	e (mm)	λ (W/m. K)	e/λ (m <sup>2</sup> .K/W)
Pédale en béton sur terre –plein	0.15	1.279	0.1173
barrière d'étanchéité	0.015	0.16	0.0938
Isolant thermique (polystyrène)	0.10	0.030	3.333
Dalle de compression	0.10	1.279	0.0782
Chape	0.05	1.924	0.026
Pavage	0.015	1.05	0.0143

**Tableau 1.5 : Durée moyenne de transit de différents types de marchandises entreposées en chambre froide.**

Type de porte	$d_t$ min/ t
Porte a ouverture manuelle	6
Porte a ouverture automatique	0.8

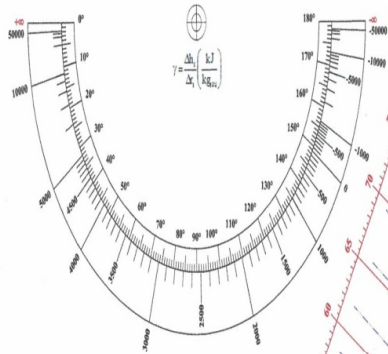
**Tableau 1.6 : Densités d'entreposage de différentes marchandises.**

Marchandise concernée	$d_e$ kg/m <sup>3</sup>	Conditionnement
Amandes décortiquées	500	Sacs
		Sacs
Non décortiquées	350	
		Caisses bois
Bananes	250	
Beurre	300	Tonnelets
	1000	cartons
Cacao	450	sacs
Coquillage	400	bourriches
Farine	700	sacs
Fromage	500	caisses
Lait	800	caisses
Maïs	700	sacs
Huile	650	tonneaux
Miel	900	tonneaux
œufs	350	caisses

**Annexe 2 : Diagramme de l'air humide.**

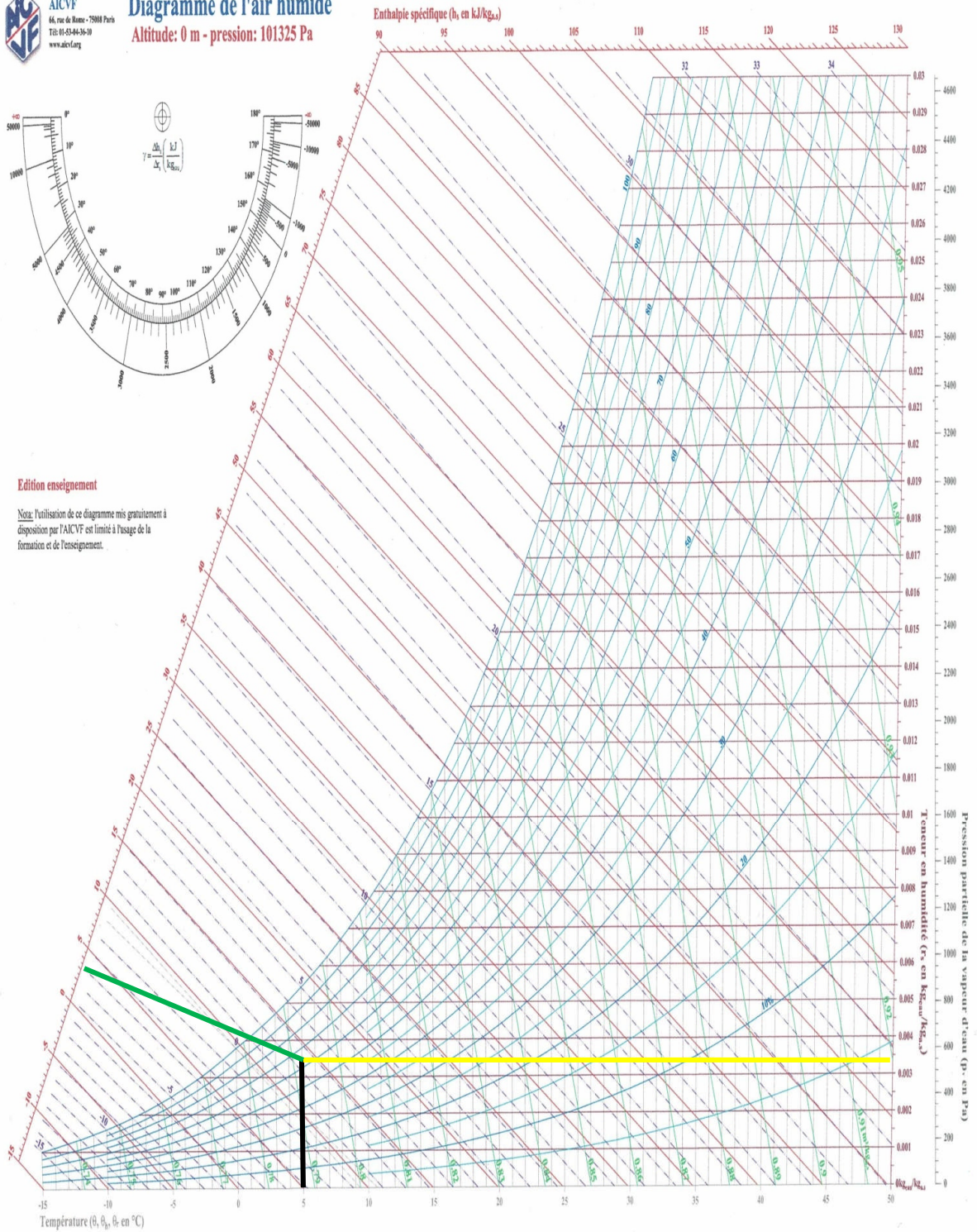


**Diagramme de l'air humide**  
 Altitude: 0 m - pression: 101325 Pa



**Edition enseignement**

*Note:* Utilisation de ce diagramme mis gratuitement à disposition par l'AICVF est limitée à l'usage de la formation et de l'enseignement.



**Tableau d'évolution de la température plan transversal situé à  $x=1/4 L$**

Y (m)	H=0	H=0,5	H=1	H=1,5	H=2	H=2,5	H=3	H=3,5
0	282,75	279,55	279,65	279,35	279,45	279,55	279,55	279,45
0,5	281,25	279,55	279,65	279,25	279,35	279,45	279,45	279,25
1	281,35	279,45	279,55	279,35	279,35	279,25	279,25	279,15
1,5	280,35	279,45	279,45	279,05	279,25	279,25	279,25	279,05
2	280,85	279,65	279,05	278,95	279,25	278,85	278,85	278,85
2,5	280,65	279,65	279,05	278,85	278,75	278,55	278,25	278,45
3	280,65	279,55	278,95	278,85	278,75	278,05	278,5	277,65
3,5	280,55	279,55	278,95	278,95	278,75	278,25	278,25	277,65
4	280,45	279,65	278,85	278,85	278,85	278,35	278,35	277,95
4,5	280,35	279,75	278,95	279,05	278,85	278,55	278,55	278,65
5	280,45	279,85	279,05	279,15	278,95	278,85	278,85	278,65
5,5	280,85	279,75	279,15	279,25	279,15	279,25	279,25	279,95
6	280,95	279,55	279,35	279,25	279,35	279,55	279,55	280,85
6,5	281,05	279,75	279,45	279,35	279,45	279,75	279,75	280,85
7	281,05	279,65	279,65	279,55	279,75	279,95	279,95	280,75

**Tableau d'évolution de la température au plan transversal  $x=2/4 L$**

Y (m)	H=0	H=0,5	H=1	H=1,5	H=2	H=2,5	H=3	H=3,5m
0	281,35	281,45	281,55	281,55	281,65	281,65	281,45	281,55
0,5	281,45	281,25	280,85	281,35	281,55	281,55	281,55	281,45
1	281,25	281,05	280,85	281,35	281,45	281,45	281,45	281,35
1,5	281,35	281,15	280,95	281,25	281,25	281,25	281,25	281,25
2	281,25	281,25	280,95	281,15	280,55	280,45	280,25	281,15
2,5	281,15	280,65	279,95	279,25	280,05	279,95	279,65	281,05
3	281,15	280,55	279,85	279,35	280,05	279,55	279,45	280,95
3,5	280,95	280,45	279,75	279,45	279,15	278,35	278,25	280,85
4	280,95	280,35	279,65	279,25	279,25	278,35	278,15	280,75
4,5	281,05	280,25	279,65	279,15	279,35	278,45	278,15	281,05
5	281,15	280,55	279,95	279,15	279,25	278,55	278,45	281,25
5,5	281,35	280,25	280,05	279,25	279,35	279,05	278,95	281,35
6	281,35	280,45	280,05	279,35	279,25	279,25	279,25	281,45
6,5	281,45	280,55	280,25	279,45	279,25	279,35	279,35	281,55
7	281,45	280,75	281,05	280,95	281,05	281,05	281,35	281,55

Tableau d'évolution de la température au plan transversal  $x=3/4 L$ 

Y (m)	H=0	H=0,5	H=1	H=1,5	H=2	H=2,5	H=3	H=3,5m
0	281,65	280,75	280,65	280,15	279,95	279,85	279,95	280,05
0,5	281,35	281,25	280,25	280,35	279,95	279,75	280,05	280,35
1	281,25	281,15	280,35	280,35	279,95	279,75	280,05	280,25
1,5	281,25	281,05	280,35	280,45	280,05	279,95	279,95	280,15
2	281,25	281,05	280,25	280,45	279,85	279,65	279,85	280,05
2,5	281,05	281,15	280,15	280,05	279,65	279,65	279,85	280,05
3	280,25	281,05	280,15	280,05	279,05	279,65	279,75	280,05
3,5	279,95	280,95	280,25	280,05	279,05	279,75	279,75	279,95
4	279,45	280,65	280,35	280,15	278,75	279,75	279,85	279,85
4,5	280,35	280,55	280,35	280,25	279,55	279,75	280,05	280,05
5	280,45	280,75	280,55	280,35	279,55	279,55	279,95	280,05
5,5	280,55	280,95	280,45	280,25	279,85	280,05	280,05	280,05
6	281,35	281,05	280,45	280,35	279,95	280,05	280,05	281,05
6,5	281,35	280,95	280,35	280,05	280,25	280,05	280,15	280,05
7	281,65	280,35	280,25	280,25	280,05	280,15	280,25	280,35

Tableau d'évolution de la température au plan longitudinal suivant l'axe Ox

X (m)	H=0	H=0,5	H=1	H=1,5	H=2	H=2,5	H=3	H=3,5m
0	279,35	280,25	280,15	279,65	279,25	279,15	279,15	279,15
0,5	280,25	280,15	280,15	279,65	279,15	279,05	279,25	279,65
1	280,65	280,05	280,05	279,55	279,25	279,05	279,25	279,65
1,5	280,65	280,05	279,95	279,45	279,25	278,95	279,05	279,45
2	280,55	279,95	279,95	279,35	279,05	278,95	278,85	279,55
2,5	280,55	279,95	280,25	279,35	278,95	278,85	278,85	279,55
3	280,55	279,95	280,05	279,25	278,95	278,75	278,75	279,65
3,5	280,65	279,85	279,95	279,25	278,95	278,05	278,75	279,55
4	280,65	279,85	279,85	279,15	278,85	277,65	278,65	279,55
4,5	280,35	279,85	279,75	279,05	277,95	277,95	278,65	279,45
5	280,35	279,65	279,65	280,05	278,05	277,85	278,35	279,45
5,5	280,25	279,65	279,35	278,95	277,95	277,95	278,25	279,55
6	280,25	279,65	279,35	278,85	278,05	277,95	278,05	279,55
6,5	279,65	279,75	279,45	278,95	277,95	278,05	278,05	279,55
7	279,55	279,85	279,35	278,85	278,15	278,25	278,15	279,55
7,5	279,65	279,85	279,55	278,85	278,25	278,25	278,25	279,35
8	280,25	279,85	279,55	279,05	278,35	278,35	278,35	279,55
8,5	280,35	279,75	279,55	279,15	278,55	278,35	278,35	279,45
9	280,45	279,85	279,65	279,15	278,65	278,45	278,45	279,45
9,5	280,45	279,95	279,45	279,25	278,85	278,65	278,65	279,35
10	280,45	279,95	279,45	279,25	278,95	278,95	278,85	279,35
10,5	280,45	279,95	279,55	279,25	278,95	278,95	278,85	279,35
11	280,55	279,95	279,65	279,45	279,15	279,15	279,25	279,25

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à  $z= 0$  m**

0	281,015	282,75	<b>z = 0 m</b>
0,5	280,17	281,25	
1	280,17	281,35	
1,5	280,17	280,35	
2	280,17	280,85	
2,5	280,17	280,65	
3	280,17	280,65	
3,5	280,17	280,55	
4	280,17	280,45	
4,5	280,17	280,35	
5	280,17	280,45	
5,5	280,17	280,85	
6	280,17	280,95	
6,5	280,17	281,05	
7	281,135	281,05	
	numérique	Expérimental	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à  $z= 0.5$  m**

0	281,86	279,55	<b>z=0.5 m</b>
0,5	279,783	279,55	
1	279,761	279,45	
1,5	279,753	279,45	
2	279,745	279,65	
2,5	279,739	279,65	
3	279,734	279,55	
3,5	279,733	279,55	
4	279,736	279,65	
4,5	279,741	279,75	
5	279,747	279,85	
5,5	279,753	279,75	
6	279,763	279,55	
6,5	279,794	279,75	
7	282,1	279,65	
	Numérique	expérimental	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 1 m**

0	281,86	279,65	<b>z= 1 m</b>
0,5	279,825	279,65	
1	279,788	279,55	
1,5	279,768	279,45	
2	279,755	279,05	
2,5	279,743	279,05	
3	279,736	278,95	
3,5	279,734	278,95	
4	279,739	278,85	
4,5	279,749	278,95	
5	279,761	279,05	
5,5	279,777	279,15	
6	279,796	279,35	
6,5	279,84	279,45	
7	282,1	279,65	
	Numérique	expérimental	

**Tableau de comparatif de la température numérique et expérimental à z= 1.5 m**

0	281,86	279,35	<b>z=1.5 m</b>
0,5	279,871	279,25	
1	279,824	279,35	
1,5	279,798	279,05	
2	279,773	278,95	
2,5	279,755	278,85	
3	279,743	278,85	
3,5	279,74	278,95	
4	279,747	278,85	
4,5	279,764	279,05	
5	279,787	279,15	
5,5	279,811	279,25	
6	279,849	279,25	
6,5	279,905	279,35	
7	282,1	279,55	
	Numérique	Expérimental	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimental à z= 2 m**

0	281,86	279,45	z=2 m
0,5	279,914	279,35	
1	279,862	279,35	
1,5	279,825	279,25	
2	279,795	279,25	
2,5	279,769	278,75	
3	279,749	278,75	
3,5	279,737	278,75	
4	279,753	278,85	
4,5	279,783	278,85	
5	279,815	278,95	
5,5	279,851	279,15	
6	279,899	279,35	
6,5	280,011	279,45	
7	282,1	279,75	
	Numérique	expérimental	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimental à z= 2.5 m**

0	281,86	279,55	z= 2.5 m
0,5	279,949	279,45	
1	279,897	279,25	
1,5	279,857	279,25	
2	279,823	278,85	
2,5	279,777	278,55	
3	279,675	278,05	
3,5	279,625	278,25	
4	279,706	278,35	
4,5	279,799	278,55	
5	279,845	278,85	
5,5	279,887	279,25	
6	279,936	279,55	
6,5	280,031	279,75	
7	282,1	279,95	
	Numérique	expérimental	

**Annexes**

---

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimental à z= 3 m**

0	281,86	279,55	<b>z=3m</b>
0,5	279,978	279,45	
1	279,927	279,25	
1,5	279,893	279,25	
2	279,859	278,85	
2,5	279,752	278,25	
3	279,461	278,5	
3,5	279,328	278,25	
4	279,511	278,35	
4,5	279,764	278,55	
5	279,877	278,85	
5,5	279,914	279,25	
6	279,954	279,55	
6,5	280,018	279,75	
7	282,1	279,95	
	<b>Numérique</b>	<b>expérimental</b>	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimental à z= 3.5 m**

0	281,369	279,45	<b>z= 3.5 m</b>
0,5	281	279,25	
1	281	279,15	
1,5	281	279,05	
2	281	278,85	
2,5	281	278,45	
3	281	277,65	
3,5	281	277,65	
4	281	277,95	
4,5	281	278,65	
5	281	278,65	
5,5	281	279,95	
6	281	280,85	
6,5	281	280,85	
7	281,55	280,75	
	<b>Numérique</b>	<b>expérimental</b>	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 0 m plan longitudinal**

1	280,65	280,17	279,15	H=0
1,5	280,65	280,17	279,15	
2	280,55	280,17	279,15	
2,5	280,55	280,17	279,15	
3	280,55	280,17	279,15	
3,5	280,65	280,17	279,15	
4	280,65	280,17	279,15	
4,5	280,35	280,17	279,15	
5	280,35	280,17	279,15	
5,5	280,25	280,17	279,15	
6	280,25	280,17	279,15	
6,5	279,65	280,17	279,15	
7	279,55	280,17	279,15	
7,5	279,65	280,17	279,15	
8	280,25	280,17	279,15	
8,5	280,35	280,17	279,15	
9	280,45	280,17	279,15	
9,5	280,45	280,17	279,15	
10	280,45	280,17	279,15	
10,5	280,45	280,17	279,15	
11	280,55	280,17	279,15	
	EXP	NUM	ANALY	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 0.5 m plan longitudinal**

0,5	280,15	279,864	279,15	H=0.5 m
1	280,05	279,832	279,15	
1,5	279,95	279,789	279,15	
2	279,95	279,756	279,15	
2,5	280,25	279,736	279,15	
3	280,05	279,729	279,15	
3,5	279,95	279,721	279,15	
4	279,85	279,715	279,15	
4,5	279,75	279,707	279,15	
5	279,65	279,701	279,15	
5,5	279,35	279,694	279,15	
6	279,35	279,688	279,15	
6,5	279,45	279,681	279,15	
7	279,35	279,676	279,15	
7,5	279,55	279,669	279,15	
8	279,55	279,663	279,15	
8,5	279,55	279,657	279,15	
9	279,65	279,65	279,15	

**Annexes**

9,5	279,45	279,643	279,15
10	279,45	279,637	279,15
10,5	279,55	279,621	279,15
11	279,65	279,602	279,15
	exp	num	ANALY

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 1 m plan longitudinal**

0,5	279,65	279,855	279,15	H=1 m
1	279,55	279,809	279,15	
1,5	279,45	279,772	279,15	
2	279,35	279,751	279,15	
2,5	279,35	279,738	279,15	
3	279,25	279,731	279,15	
3,5	279,25	279,724	279,15	
4	279,15	279,719	279,15	
4,5	279,05	279,713	279,15	
5	279,05	279,706	279,15	
5,5	278,95	279,7	279,15	
6	278,85	279,696	279,15	
6,5	278,95	279,689	279,15	
7	278,85	279,684	279,15	
7,5	278,85	279,677	279,15	
8	279,05	279,673	279,15	
8,5	279,15	279,666	279,15	
9	279,15	279,661	279,15	
9,5	279,25	279,654	279,15	
10	279,25	279,647	279,15	
10,5	279,25	279,631	279,15	
11	279,45	279,61	279,15	
	exp	num	ANALY	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 1.5 m plan longitudinal**

0,5	279,15	279,846	279,15	H=1.5 m
1	279,25	279,801	279,15	
1,5	279,25	279,77	279,15	
2	279,05	279,743	279,15	
2,5	278,95	279,754	279,15	
3	278,95	279,736	279,15	
3,5	278,95	279,729	279,15	
4	278,85	279,724	279,15	
4,5	277,95	279,716	279,15	
5	278,05	279,71	279,15	
5,5	277,95	279,705	279,15	
6	278,05	279,7	279,15	

## Annexes

6,5	277,95	279,694	279,15
7	278,15	279,69	279,15
7,5	278,25	279,684	279,15
8	278,35	279,678	279,15
8,5	278,55	279,671	279,15
9	278,65	279,667	279,15
9,5	278,85	279,657	279,15
10	278,95	279,649	279,15
10,5	278,95	279,63	279,15
11	279,15	279,61	279,15
	exp	num	ANALY

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 2 m plan longitudinal**

0,5	279,05	279,833	279,15	H= 2 m
1	279,05	279,801	279,15	
1,5	278,95	279,774	279,15	
2	278,95	279,759	279,15	
2,5	278,85	279,742	279,15	
3	278,75	279,729	279,15	
3,5	278,05	279,715	279,15	
4	277,65	279,704	279,15	
4,5	277,95	279,693	279,15	
5	277,85	279,693	279,15	
5,5	277,95	279,685	279,15	
6	277,95	279,684	279,15	
6,5	278,05	279,682	279,15	
7	278,25	279,678	279,15	
7,5	278,25	279,673	279,15	
8	278,35	279,671	279,15	
8,5	278,35	279,663	279,15	
9	278,45	279,657	279,15	
9,5	278,65	279,648	279,15	
10	278,95	279,641	279,15	
10,5	278,95	279,624	279,15	
11	279,15	279,611	279,15	
	exp	num	ANALY	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 2.5 m plan longitudinal**

0,5	279,25	279,832	279,15	H=2.5 m
1	279,25	279,805	279,15	
1,5	279,05	279,717	279,15	
2	278,85	279,666	279,15	
2,5	278,85	279,632	279,15	
3	278,75	279,605	279,15	
3,5	278,75	279,595	279,15	
4	278,65	279,591	279,15	
4,5	278,65	279,599	279,15	
5	278,35	279,605	279,15	
5,5	278,25	279,613	279,15	
6	278,05	279,625	279,15	
6,5	278,05	279,628	279,15	
7	278,15	279,631	279,15	
7,5	278,25	279,631	279,15	
8	278,35	279,631	279,15	
8,5	278,35	279,63	279,15	
9	278,45	279,632	279,15	
9,5	278,65	279,627	279,15	
10	278,85	279,623	279,15	
10,5	278,85	279,616	279,15	
11	279,25	279,589	279,15	
	exp	num	ANALY	

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 3 m plan longitudinal**

0,5	280,15	279,223	279,15	H = 3 m
1	280,05	279,243	279,15	
1,5	280,05	279,253	279,15	
2	279,95	279,308	279,15	
2,5	279,95	279,321	279,15	
3	279,95	279,34	279,15	
3,5	279,85	279,372	279,15	
4	279,85	279,404	279,15	
4,5	279,85	279,425	279,15	
5	279,65	279,438	279,15	
5,5	279,65	279,463	279,15	
6	279,65	279,491	279,15	
6,5	279,75	279,51	279,15	
7	279,85	279,527	279,15	
7,5	279,85	279,553	279,15	

## Annexes

8	279,85	279,557	279,15
8,5	279,75	279,573	279,15
9	279,85	279,585	279,15
9,5	279,95	279,593	279,15
10	279,95	279,602	279,15
10,5	279,95	279,619	279,15
11	279,95	279,63	279,15
	exp	num	ANALY

**Tableau comparatif de la température numérique et expérimentale à z= 3.5 m plan longitudinal**

0,5	279,65	281	279,15	H= 3.5 m
1	279,65	281	279,15	
1,5	279,45	281	279,15	
2	279,55	281	279,15	
2,5	279,55	281	279,15	
3	279,65	281	279,15	
3,5	279,55	281	279,15	
4	279,55	281	279,15	
4,5	279,45	281	279,15	
5	279,45	281	279,15	
5,5	279,55	281	279,15	
6	279,55	281	279,15	
6,5	279,55	281	279,15	
7	279,55	281	279,15	
7,5	279,35	281	279,15	
8	279,55	281	279,15	
8,5	279,45	281	279,15	
9	279,45	281	279,15	
9,5	279,35	281	279,15	
10	279,35	281	279,15	
10,5	279,35	281	279,15	
11	279,25	281	279,15	
	expé	num	ANALY	

**ANNEXE 3 :**

**Fiche technique d'un Multimétre :**

	DMM240
	RMS Fc à 500HZ :3
Afficheur	40 000 pts rétro-éclairé avec bargraph
Précision de base	0,06 %
Bande passante	45 Hz à 1 kHz
V <sub>AC</sub>	0,1 mV à 1000 V
I <sub>AC</sub>	0,1 µA à 10 A (20 A max.)
Résistance	0,01 Ω à 40 MΩ
Continuité sonore	Oui
capacité	0,001 nF à 40 mF
température	-20 °C à +1000 °C Thermocouple type K
Fréquence	40,00 à 400,00 Hz
Catégorie de mesure	600 V CAT IV / 1000 V CAT III selon IEC-61010
Dimensions /Poids	187 x 81 x 50 mm / 342 gr env.
Mode Relatif	oui

**ANNEXE 4 :**

**Fiche technique d'un thermomètre infra rouge :**

Utilisation : toutes mesures

- Mesures précises et stables
- Ecran LCD rétro éclairé
- Celsius et Fahrenheit
- S'éteint automatiquement en cas d'inactivité pour économiser la batterie (7 secondes)
- Poids : 162 grammes
- Longueur d'ondes : 8 $\mu$ m à 14  $\mu$ m
- Laser de visé : Fonction ON / OFF
- Dimensions : 15 x 9 cm
- Piles : 9V (non fournie)
- Température mesurée : -50 à 550 °C (-58 à 1022°F)
- Marge d'erreur :  $\pm 1.5\%$
- Ratio de distance : 12 : 1
- Résolution : 0.1
- Sauvegarde de mesures: possibilité
- Temps de mesure : 0.5 secondes
- Emissivité : 0.95
- Couleur : Jaune et Noir

**Annexe 5 :**

**Caractéristique de la chambre froide**

Types de chambre froide	Chambre froide positive
Largeur	7 m
Hauteur	3.5 m
Longueur	11 m
Type de moteur	MTZ 200
Types de produit conservé	Produits laitier (fromage blanc )

**Caractéristique de l'isolation**

	Types d'isolants	Epaisseurs [mm]	Conductivité thermique $\lambda$ [w/m .K]
Toit	Panneaux sandwich (Mousse de polyuréthane)	100	0.027
Sol	Pédale en béton sur terre-plein	0.15	1.279
	Barrière d'étanchéité	0.015	0.16
	Isolants thermique (polystyrène)	0.10	0.030
	Dalle de compression	0.10	1.279
	Chape	0.05	1.924
	Pavage	0.015	1.05
Murs	Panneaux Sandwich (Mousse de polyuréthane)	100	0.027

